Ф. А. СТУПЕЛЬ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Издание второе

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ХАРЬКОВСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. А. М. ГОРЬКОГО
Харьков 1956

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электромеханические реле являются одним из наиболее распространенных элементов устройств автоматики и телемеханики. Методы расчета реле базируются на теории ферромагнетизма, теории электромагнитного поля и на теории электромагнитных цепей.

Советскими физиками и металловедами — В. К. Аркадьевым, Н. С. Акуловым, А. С. Займовским, В. С. Меськиным и другими — решен ряд сложных задач по теории ферромагнетизма, выяснению структуры и свойств электротехнических сплавов. В результате их работ получены и освоены новые виды электроматериалов, применяемых в электрических цепях со сталью.

Вопросы электродинамики освещены в работах Я. И. Френкеля и И. Е. Тамма. Работы В. И. Коваленкова — «Теория электромагнитных цепей» и «Основы теории магнитных цепей», удостоенные Сталинской премии, дают возможность построения методики расчета сложных магнитных систем.

Вопросы теории электромагнитных систем освещены в работах А. Я. Буйлова, Б. С. Сотскова, Н. А. Лифшица. Теория индукционных систем и реле освещена в работах А. М. Бресслера, Б. К. Буля, Л. А. Гельбуха. Практические вопросы расчета кодовых и телефонных реле даны в работах М. Н. Витенберга.

В настоящей книге автор стремился к обобщению многочисленных работ по вопросам теории и методов расчета электрических реле и механизмов. Особое внимание уделено вопросам проектирования этих устройств.

В работе приняты такие формулы и соотношения, которые дают возможность анализировать при проектировании влияние отдельных параметров на работу реле; это позволяет проводить систематизацию расчетных материалов и накопление данных для получения оптимального решения поставленных задач. В книге приведен ряд примеров расчета и практических данных из опыта нашей промышленности.

Книга составлена в качестве учебного пособия для студентов электротехнических специальностей; автор надеется, что она будет полезной и для инженерно-технических работников в их практической работе по созданию новых, более совершенных конструкций электрических реле и механизмов.

Автор выражает глубокую признательность профессору Б. Ф. Вашура, доцентам А. П. Сукачеву и Н. А. Калужникову, давшим ряд ценных указаний при рецензировании настоящего пособия.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1. Электрическая цепь

U — напряжение — действующее значение;
U_m — напряжение — максимальное значение;
u — напряжение — мгновенное значение;
E — э. д. с. — действующее значение;
e — э. д. с. — мгновенное значение;
I — ток — действующее значение;
I_m — ток — максимальное значение;
i — ток — мгновенное значение;
R, r — сопротивление активное;
X, x — сопротивление реактивное;
Z — сопротивление полное;
P — мощность активная;
$P_г$ — потери на гистерезис;
$P_в$ — потери на вихревые токи;
P_n — суммарные потери на гистерезис и вихревые токи.
Q — мощность реактивная;
t — время; T — период; f — частота;
ω — угловая скорость, электрическая;
ρ — удельное сопротивление;
γ — удельная проводимость;
w — число витков.

2. Магнитная цепь

Φ — магнитный поток—максимальное значение;
Φ_t — магнитный поток — мгновенное значение;
B — магнитная индукция — максимальное значение;
B_t — магнитная индукция — мгновенное значение;
B_r — остаточная магнитная индукция;
μ — магнитная проницаемость;
$\mu_{макс}$ — магнитная проницаемость — максимальное значение;
$\mu_н$ — магнитная проницаемость — начальное значение;
μ_r — магнитная проницаемость — обратимая.
μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;
R — магнитное сопротивление;
G — магнитная проводимость;
g — удельная магнитная проводимость;
L — индуктивность;
M — индуктивность, взаимная;
σ — коэффициент рассеяния;
H — напряженность магнитного поля;
H_c — коэрцитивная сила;
F — намагничивающая сила;
W — магнитная энергия.

3. Механические и физические величины

W — энергия;
A — работа;
Q — сила — среднее значение;
Q_t — сила — мгновенное значение;
M — момент вращения — среднее значение;
M_t — момент вращения — мгновенное значение;
J — момент инерции;
v — скорость; ω — угловая скорость;
R, r — радиус;

D, d — диаметр;
n — скорость вращения (число оборотов в минуту);
ϑ — температура;
θ — превышение температуры;
V — объем;
m — масса;
g — ускорение силы тяжести;
G — вес;
γ — удельный вес;
μ — коэффициент трения;
δ — зазор;
Δ — толщина диска, барабана;
σ — напряжение нормальное;
τ — напряжение касательное;
$R_{изг}$ — допускаемое напряжение при изгибе;
$R_{кр}$ — допускаемое напряжение при кручении;
σ_b — предел прочности при растяжении.

Соотношения между практическими и абсолютными единицами измерений

Система	*MKSA*	*CGSM*
Поток, Φ	вебер (*вб*)	максвелл (*мкс*) $1\ мкс = 1 \cdot 10^{-8}\ вб$
Индукция, B	*вб/см²*	гаусс (*гс*) $1\ гс = 1 \cdot 10^{-8}\ \frac{вб}{см^2}$
Напряженность магнитного поля, H	ампер на сантиметр $\left(\frac{а}{см}\right)$	эрстед (*эр*) $1\ эр = 1{,}256\ \frac{а}{см}$

ВВЕДЕНИЕ

ЗНАЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ

Развитие современной техники связано с широким применением автоматизации производственных процессов. Сущность автоматизации заключается в том, что соответствующие механизированные установки или агрегаты снабжаются такими приборами или устройствами, которые автоматически управляют работой механизмов по определенному заранее установленному режиму, без вмешательства человека.

Народнохозяйственное и политическое значение автоматизации чрезвычайно велико: при автоматизации процессов резко повышается производительность агрегатов и установок, улучшается качество продукции, достигаются такие темпы работы, которые немыслимы, когда механизмами управляет человек. Автоматизация производства приводит к коренным изменениям в структуре рабочего состава на заводах, фабриках, электростанциях, приводит к созданию новых интеллектуально-технических рабочих специальностей, к уничтожению противоположности между физическим и умственным трудом. В исторических решениях XVIII съезда ВКП(б) были намечены меры по осуществлению автоматизации в важнейших отраслях промышленности и транспорта. В решениях XIX съезда КПСС также было уделено большое внимание вопросам автоматизации производственных процессов. В соответствии с директивами съезда, выпуск приборов управления и контроля должен увеличиться в текущей пятилетке в 2,7 раза, чтобы возможно было осуществить автоматизацию процессов во всех отраслях промышленности, в энергетике и на транспорте.

РАБОТЫ ДОРЕВОЛЮЦИОННЫХ И СОВЕТСКИХ УЧЕНЫХ И ИНЖЕНЕРОВ

Основные теоретические положения, принимаемые для построения устройств автоматики, заимствованы из электроизмерительной техники, области, развившейся значительно ранее автоматики. Приоритет в разработке теории и конструкций электроизмерительных приборов принадлежит русским ученым.

Первый измерительный прибор — электроскоп — был создан в 1751 г. Г. В. Рихманом и уже содержал основной принцип построения измерительного прибора и реле: взаимодействие двух

сил, одна из которых является функцией измеряемой величины, а другая — функцией положения подвижной части. М. В. Ломоносов, изучая электрические явления, дал идею использования сил взаимодействия электрических токов для построения электроизмерительных приборов. В начале XIX ст. русские ученые Э. Х. Ленц и Б. С. Якоби создали учение об электромагнитной индукции, дав, таким образом, предпосылки для построения индукционных приборов и реле.

В конце XIX ст. М. О. Доливо-Добровольский, развивая предложенную им идею применения трехфазного тока, разработал ряд новых измерительных приборов, в частности первый фазометр, основанный на принципе вращающегося магнитного поля. В 1913 г. М. О. Доливо-Добровольский, основываясь на классических работах А. Г. Столетова в области намагничивания стали, впервые разработал ферродинамические приборы.

Приоритет в области устройств автоматики принадлежит русским инженерам.

И. П. Ползунов применил в своей машине автоматическое парораспределение. К. Д. Фролов построил на Алтае завод с рядом механических полуавтоматических и автоматических станков. Современник Ломоносова, талантливый механик самоучка И. П. Кулибин изобрел и изготовил ряд физических приборов, а также уникальные часы с группой автоматически действующих фигур.

В первой половине XIX ст. П. Л. Шиллинг изобрел первый реально действующий телеграфный аппарат, телеграфное реле. Чиколевым разработан автоматический регулятор для дуговых печей, Константиновым — автоматический регулятор для электрических машин.

Однако работы русских ученых и изобретателей не получили должного применения в царской России. Осуществлению идей и изобретений русских ученых мешал не только низкий уровень промышленности в России, но и зависимость от крупных иностранных фирм. До революции отдельные реле изготовлялись только в небольших мастерских.

Великая Октябрьская социалистическая революция положила начало быстрому развитию отечественной электропромышленности. В годы осуществления довоенных пятилеток наша электротехническая промышленность, и в частности релестроение, обогатилась рядом крупных достижений. Производство реле в СССР было начато в 1928 г. на Харьковском электромеханическом заводе (ХЭМЗ). Уже к концу первой пятилетки было разработано и внедрено в производство большое количество реле для автоматического управления сложными электроприводами, например, для доменного подъема, блюмингов, бумагоделательных машин, а также защитных реле для энергосистем.

Дальнейшее развитие в релейном производстве ХЭМЗа проходило в области создания новых видов реле для защиты энергосистем и автоматизации производственных процессов. Ряд новых

конструкций создан инженерами завода А. М. Бресслером, Я. Н. Штрафуном, А. С. Тулиным, автором и другими.

Значительный прогресс в области релестроения в Советском Союзе определялся необходимостью автоматизации оборудования канала имени Москвы (1936—1937 гг.).

Теория устройств автоматики, теория релейной защиты обогатились работами ряда научно-исследовательских институтов и кафедр высших технических учебных заведений.

В области теории релейной защиты известны работы профессоров Н. Ф. Марголина, А. М. Федосеева, Г. И. Атабекова. В области расчета электромагнитных систем ряд положений разработан профессором А. Я. Буйловым, Б. С. Сотсковым, Б. К. Буль и другими. Б. К. Буль разработал методику расчета индукционных дисковых систем, исследовал работу таких систем.

Большое значение имеют работы Л. А. Гельбуха, который впервые дал методику расчета индукционных барабанных систем и методику аналитического исследования переходных процессов в этих системах. А. С. Тулин и В. Л. Фабрикант провели имеющие большое практическое значение работы по исследованию индукционных систем. На основе работ А. С. Тулина и А. Бресслера созданы совершенные модели дистанционных реле.

В настоящее время в СССР имеется ряд специализированных институтов и заводов, разрабатывающих и изготовляющих большое число видов реле и устройств автоматики.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

В общем виде всякую автоматизированную установку можно считать состоящей из следующих основных элементов:

1) механизмы или агрегаты, осуществляющие необходимые для данной установки операции или функции;

2) силовые аппараты, осуществляющие в механизме или агрегате необходимые манипуляции;

3) устройства автоматического управления, настроенные на определенный режим работы и воздействующие на силовые устройства.

Устройства автоматического управления исполняются в виде высокочувствительных приборов: реле, автоматических регуляторов, датчиков. В ряде случаев между этими приборами и силовыми аппаратами устанавливаются усилительные устройства.

Реле — прибор, настроенный на определенный режим работы механизма, агрегата или установки. Реле действует при *определенных стадиях* режима и действие его передается силовому аппарату.

Автоматический регулятор — прибор (или система приборов и усилителей), задачей которого является поддержание постоянным определенного состояния в автоматизированной установке или агрегате.

Датчики — специальные приборы, замеряющие определенные величины, характеризующие технологический процесс. Замеры датчиков передаются к измерительной части реле или регуляторов — непосредственно или через усилители.

ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЛЕ

Классификация реле производится по разным признакам: по назначению, по замеряемым величинам, по принципу действия, по способу включения.

1) Классификация по назначению

Различают реле:

управления — для автоматического управления работой электродвигателей;

защиты — для автоматической защиты электрических устройств;

автоматизации производственных процессов.

2) Классификация по замеряемой величине

Электрические — тока, напряжения, мощности, частоты, коэффициента мощности, сопротивления;

оптические — силы света, длины волны, прозрачности, мутности, цветности и другие;

тепловые — температуры, количества тепла;

акустические — силы звука и т. д.;

механические — силы, давления, скорости, ускорения, линейных перемещений, уровня, объема;

разных физических величин — времени, вязкости, плотности.

3) Классификация по принципу действия

Электромагнитные; индукционные; магнитоэлектрические; электродинамические; тепловые; механические.

4) Классификация по способу включения

Первичные — катушки реле включаются непосредственно в основную цепь защищаемого или управляемого объекта;

вторичные — катушки реле включаются во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока и напряжения;

промежуточные — катушки реле включаются в цепь между основными реле защиты или управления и другими реле или аппаратами и получают питание от отдельного источника тока.

Реагирование на замеряемую величину — ток, напряжение, мощность и другие — может быть осуществлено по-разному. Различают:

реле максимального действия — срабатывающие при появлении или увеличении заданной величины;

реле минимального действия — срабатывающие при исчезновении или уменьшении заданной величины;

реле направленного действия — срабатывающие при изменении направления движения или знака заданной величины;

реле дифференциальные — срабатывающие при наличии разности значений нескольких величин;

балансные — в которых складываются или вычитаются силы, создаваемые двумя или несколькими элементами замера.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Точный расчет электромагнитных систем и электрических реле связан с весьма громоздкими и трудоемкими вычислениями, что определяется в основном следующими причинами:

1) зависимость индукции от напряженности поля для цепи со сталью нелинейна;

2) значение индукции в рабочих зазорах магнитопровода распределяется неравномерно; по данным проведенных исследований при малых зазорах индукция имеет максимум у середины полюса, а по краям значение ее уменьшается, при больших зазорах получается обратная картина;

3) картина распределения поля в воздушных зазорах магнитопровода, а также поля утечки, весьма сложна;

4) закон распределения потоков в системе в значительной степени зависит от расположения катушки в магнитопроводе;

5) температура нагрева различных частей магнитопровода и катушки неодинакова.

Точный расчет электромагнитных систем затруднен еще тем, что принимаемые в расчетах данные о материалах и размерах получают иногда значительные отклонения в условиях производства. Так, данные о кривых намагничивания имеют отклонения в пределах $\pm (10 \div 15)\,\%$, данные о потерях на гистерезис и вихревые токи весьма неточны и в зависимости от условий обработки детали могут отклоняться от лабораторных в два-три раза, значения нерабочих зазоров — в стыках — могут изменяться в два-три раза, в условиях производства имеют отклонения значения коэффициентов заполнения меди и стали.

Существующие методы расчета электромагнитных систем и электрических реле как аналитические, так и графо-аналитические, построены с учетом ряда допущений:

1) поле в рабочих зазорах принимается однородным, с учетом среднего значения индукции;

2) упрощенно вычисляют значения проводимостей воздушных зазоров и путей утечки;

3) не учитывают влияния расположения катушки в магнитопроводе (по отношению к рабочему зазору);

4) потоки и токи в системах переменного тока принимают синусоидальными;

5) учитывают обычно среднестатистические данные кривых намагничивания.

Инженерные методы расчета должны учитывать возможности как проектирования системы, т. е. разработки модели по заданным эксплуатационным параметрам, так и расчета системы, т. е. вычисления ее параметров по заданным геометрическим размерам.

Опубликованные в литературе аналитические методы расчета, в которых нелинейности магнитной цепи учтены определенной апроксимацией кривых, содержат в себе сложные зависимости, не дающие возможности анализа влияния отдельных параметров на работу системы и установления оптимальных соотношений. Поэтому такие методы пригодны только для расчета системы определенных размеров.

В принятых в практике инженерных методах расчета пользуются как аналитическими соотношениями, так и графическими материалами — кривыми и векторными диаграммами. Такие методы расчета называют графо-аналитическими.

Получающиеся при этом соотношения, весьма простые по своей структуре, дают возможность проведения не только расчета, но и проектирования системы, установления оптимальных соотношений, позволяют конструктору определять, какие параметры системы требуется изменить в том случае, когда по технологическим причинам исполненная модель не соответствует проектным данным.

Принимая во внимание, что существующие методы расчета построены с учетом ряда допущений, а также учитывая возможные технологические отклонения, следует проводить проектирование с учетом некоторого запаса. Так, например, при расчете системы принимают значение превышения температуры несколько меньшим предельно допустимого (на 10°).

В данном пособии изложены инженерные графо-аналитические методы расчета, позволяющие решать вопросы как проектирования, так и расчета электромагнитных систем и реле. Такие методы также приняты и по методическим соображениям: при проведении расчета графо-аналитическими методами более наглядно выявляется физическая сущность происходящих процессов, что весьма важно для изучающих данную дисциплину.

В перечне литературы приведены статьи и книги, в которых освещены аналитические методы расчета.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

ГЛАВА I

МАГНИТОПРОВОД

1-1. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДОВ

Для изготовления магнитопроводов реле применяются разнообразные сорта сталей и сплавов, обладающих ферромагнитными свойствами. Выбор того или иного материала определяется, с одной стороны, назначением магнитной системы, а с другой — магнитными свойствами материала. К основным величинам, характеризующим свойства таких сталей и сплавов, относятся:

1) B_s — индукция насыщения — максимально возможное значение индукции в материале, при котором дальнейшее усиление поля не увеличивает намагниченности тела;

2) B_r — остаточная индукция, т. е. величина индукции при $H = 0$, получающаяся при размагничивании материала от максимального значения B_s; при размагничивании от значения $B < B_s$ величина индукции при $H = 0$ уменьшается;

3) H_c — коэрцитивная сила — напряженность магнитного поля, необходимая для снижения остаточной индукции до нуля; значения B_r и H_c определяются по размагничивающему циклу кривой намагничивания. В данных заводов значения B_r и H_c приводятся для материалов, намагниченных до индукции насыщения B_s;

4) μ — магнитная проницаемость; значение μ изменяется с изменением поля и определяется по начальной кривой намагничивания, как отношение $\frac{B}{H}$.

5) $\mu_н$ — начальная магнитная проницаемость — значение проницаемости в очень слабых магнитных полях, близких к нулю;

6) $\mu_{макс}$ — максимальная магнитная проницаемость;

7) $P_г$ и $P_в$ — потери на гистерезис и вихревые токи;

8) точка Кюри — температура, при которой ферромагнитные материалы теряют свои магнитные свойства.

1-2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

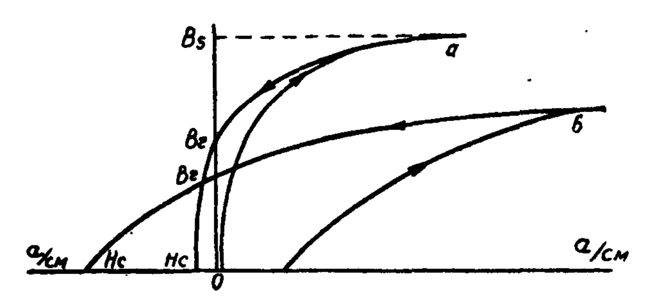
Промышленное значение получили магнитные материалы, обладающие крайними значениями магнитных свойств (фиг. 1,1).

Различают следующие основные виды магнитных материалов:

1) *магнитномягкие*, обладающие низкой коэрцитивной силой H_c и высоким значением магнитной проницаемости μ. Такие мате-

риалы применяются для изготовления магнитных систем разных видов реле;

2) *магнитнотвердые*, обладающие высокими значениями коэрцитивной силы H_c; значение μ у этих материалов во много раз



Фиг. 1, 1. Характеристики магнитных материалов:
a — магнитномягких; *b* — магнитнотвердых.

меньше, чем у магнитномягких материалов. Магнитнотвердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов. Особую группу представляют собой термомагнитные сплавы, обладающие низкой точкой Кюри (порядка $10 \div 100^\circ$). Эти сплавы применяются для температурной компенсации.

1-3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДОВ

В практике применяются различные магнитномягкие материалы, отличающиеся различными свойствами в области слабых, средних и сильных полей, различными значениями коэрцитивной силы, удельных потерь, условиями технологической обработки и стоимости.

Сталь конструкционная — разных профилей с содержанием углерода от 0,1 до 0,4%. Обладает хорошими технологическими свойствами в отношении штамповки и обработки режущими инструментами.

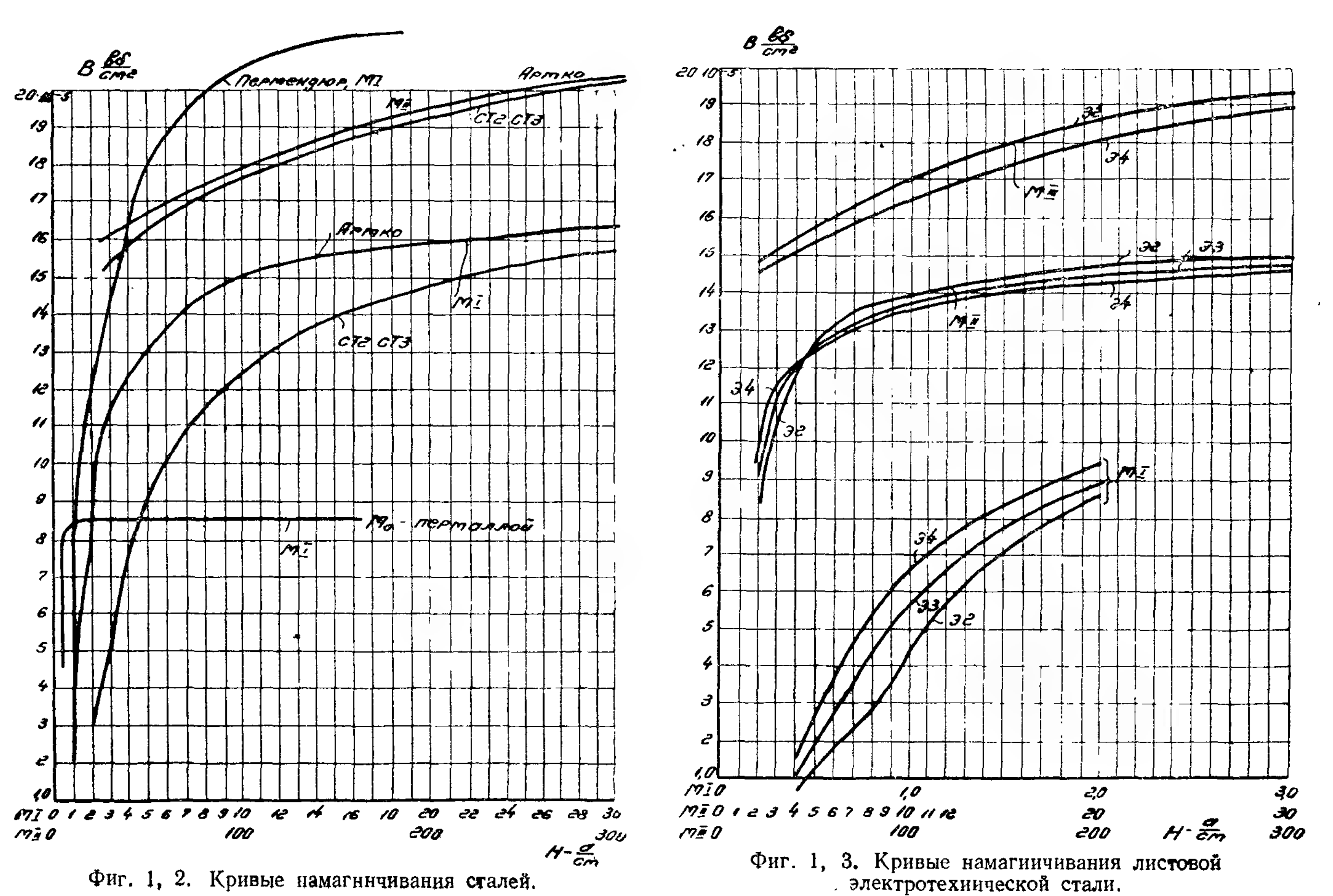
$$B_s \cong 23 \cdot 10^{-5} \frac{вб}{см^2};\ H_c \text{ — до } 3\ \frac{a}{см};\ \gamma = 7{,}85 \frac{Г}{см^3}.$$

Кривые намагничивания для сталей СТ-2 и СТ-3, выполненные по данным завода «Электросила», приведены на фигуре 1, 2.

Кремнистая сталь — круглая, с добавлением кремния.

$$B_s = 20 \cdot 10^{-5} \frac{вб}{см^2};\ B_r = 6 \cdot 10^{-5} \div 8 \cdot 10^{-5};$$

$$H_c = (0{,}4 \div 0{,}6) \frac{a}{см};\ \gamma = 7{,}6.$$



Фиг. 1, 2. Кривые намагничивания сталей.

Фиг. 1, 3. Кривые намагничивания листовой электротехнической стали.

Железо Армко. Содержит примеси не более 0,14%, легко обрабатывается, изготовляется в виде листов и прутков. Выпускается двух марок:

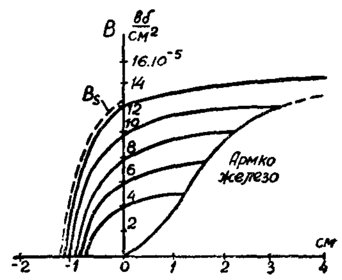
для глубокой штамповки,

$$H_c = 1\,\frac{a}{см};$$

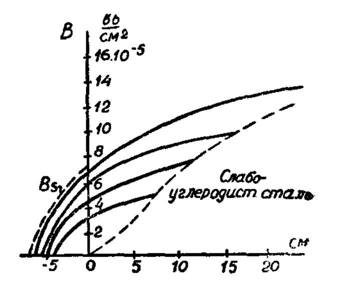
для магнитопроводов,

$$H_c = 0{,}8\,\frac{a}{см}.$$

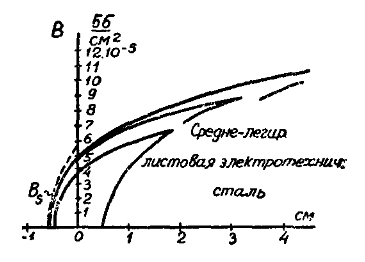
Кривые намагничивания см. на фигуре 1, 2.



Электротехническая сталь. Изготовляется в виде листов толщиной от 0,35 *мм* до 2 *мм*, а для высоких частот от 0,05 до 0,2 *мм*. По степени легированности различают следующие марки электротехнической стали: Э1, Э2, Э3, Э4. Данные указанных марок см. в таблице 1. Кривые намагничивания показаны на фигуре 1, 3, кривые размагничивания — на фигуре 1, 4.



Сталь ХВП — холоднокатанная, высокой проницаемости, выпускается в виде листов. Листы и ленты этой стали обладают резко выраженной анизотропией: высокие магнитные свойства получаются только в том случае, когда направление потока совпадает с направлением прокатки листа.



Фиг. 1, 4. Кривые размагничивания магнитномягких материалов.

Средние данные сталей ХВП:

$P_{10} = 0{,}84\,\frac{вт}{кГ}$; $P_{15} = 1{,}95\,\frac{вт}{кГ}$;

Индукция при $H = 0{,}05\,\frac{a}{см}$; $B = 500\ гс = 0{,}5 \cdot 10^{-5}\,\frac{вб}{см^2}$

$H = 25\,\frac{a}{см}$; $B = 17300\ гс = 17{,}3 \cdot 10^{-5}\,\frac{вб}{см^2}$;

$H = 50\,\frac{a}{см}$; $B = 18400\ гс = 18{,}4 \cdot 10^{-5}\,\frac{вб}{см^2}$;

$H_c = 0{,}16\ a/см.$

е) Пермаллой — сплав с содержанием никеля. Различают две основные группы пермаллоя: низконикелевые и высоконикелевые.

Сплавы пермаллоя легируются молибденом, хромом и медью. Данные пермаллоя:

1) низконикелевый — с содержанием Ni — 45% ÷ 50%, легко обрабатывается резанием, штампуется. Изготовляется в виде холоднокатанных полос шириной 80—250 *мм* и толщиной 0,1—3 *мм*; прутков диаметром 8 ÷ 30 *мм* и проволоки диаметром 0,5 ÷ 3 *мм*.

$$B_s = 16 \cdot 10^{-5} \left(\text{в поле } 12 \div 13 \ \frac{a}{см}\right); \ B_r = 10 \cdot 10^{-5} \ \frac{вб}{см^2};$$

$$H_c = 0{,}24 \ a/см; \ \mu_{\text{макс}} = 25 \cdot 10^{-5} \ \frac{вб}{a/см} \left(\text{в поле } 0{,}16 \ \frac{a}{см}\right).$$

$$\mu_н = 3{,}1 \cdot 10^{-5} \ \frac{вб}{a/см}; \ \gamma = 8{,}15; \ \rho = 0{,}45 \ ом \ \frac{мм^2}{м};$$

2) высоконикелевый молибденовый пермаллой — с содержанием 78,5Ni + 3,8Mo + Fe легко обрабатывается штамповкой, резанием. Изготовляется в виде холоднокатанных полос шириной от 80 до 250 *мм*, толщиной от 0,1 до 3 *мм*; кованых и горячекатанных прутков диаметром от 8 до 30 *мм*; холоднокатанной проволоки диаметром от 0,5 до 3 *мм*.

$$B_s = 8{,}5 \cdot 10^{-5} \left(\text{в поле } 0{,}65 \ \frac{a}{см}\right); \ B_r = 6 \cdot 10^{-5}; \ H_c = 0{,}024 \ \frac{a}{см},$$

$$\mu_{макс} = 160 \cdot 10^{-5} \ \frac{вб}{a/см} \left(\text{в поле } 0{,}02 \ \frac{a}{см}\right); \ \mu_н = 10 \cdot 10^{-5};$$

$$\rho = 0{,}55 \ ом \ \frac{мм^2}{м}.$$

Пермендюр — сплав с содержанием Co — 49%, V — 1,7%, Fe. Обладает исключительно высокой индукцией насыщения B_s, достигаемой в сравнительно слабых полях. Изготовляется в виде холоднокатанных листов, толщиной от 0,2 до 2 *мм*; прутков диаметром от 8 до 30 *мм*.

$$B_s = 24 \cdot 10^{-5} \ \frac{вб}{см^2}; \ B_r = 13 \cdot 10^{-5} \ \frac{вб}{см^2}; \ H_c = 1{,}2 \ \frac{a}{см}.$$

1-4. ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ

Механическая обработка. Детали магнитопровода из стали, железа Армко, пермаллоя могут быть изготовлены штамповкой, ковкой, обработкой резцами. Детали для шихтованных магнитных систем (жести) получают штамповкой.

Листовые электротехнические стали пригодны только для изготовления плоских деталей, так как обладают хрупкостью, возрастающей с увеличением содержания кремния. По данным ГОСТ листы марки Э1 и Э2 должны выдерживать без излома 10 перегибов, а марки Э4 — 1 перегиб.

Термическая обработка. В процессе изготовления деталей в них возникают местные изменения структуры, приводящие

Таблица 1

Сталь листовая электротехническая

Наименование	Марка	Толщина листов, *мм*	Магнитная индукция: $B_{гс}$ при $H = 25\ \frac{а}{см}$	$B_{гс}$ при $H = 50$	$B_{гс}$ при $H = 100$	$B_{гс}$ при $H = 300$	Удельные потери при $f = 50$ *гц*, *вт/кГ* не более: p_{10}	p_{15}	B_r, *гс*	H_c, *а/см*	уд. вес γ	Сод. кремния
			не менее									
Слабо-легированная	Э1	2,0; 1,5							7000—10000	0,8	7,8	до 2%
	Э1	1,0										
	Э1	0,42; 0,5	14700	15800	17000	19200	3,6	8,6				
	Э1А	0,42; 0,5	15000	16200	17500	19700	3,3	7,9				
	Э1АА	0,42; 0,5	14900	16000	17300	19600	3,3	7,9				
	Э1АБ	0,42; 0,5	15400	16400	17800	20200	2,85	7,0				
	Э1ААБ	0,42; 0,5	15400	16400	17800	20200	2,85	7,0				
Средне-легированная	Э2	0,42; 0,5	14700	15800	17000	19200	2,6	6,4			7,75	до 3,3%
	Э2Б	0,42; 0,5	15300	16400	17600	20100	2,6	6,4				
Повышенно легированная	Э3	0,42; 0,5	14600	15700	16900	18900	2,3	5,6	5000—8000	0,52	7,65	до 3,85%
	Э3А	0,42; 0,5	14600	15700	16900	18900	2,0	4,7				
	Э3	0,3; 0,35	14600	15700	16900	18900	2,0	4,2				
	Э3А	0,3; 0,35	14600	15700	16900	18900	1,6	3,6				
Высоко-легированная	Э4	0,42; 0,5	14400	15500	16600	18700	1,8	3,9		0,32	7,55	до 5%
	Э4А	0,42; 0,5	14400	15500	16600	18700	1,6	3,6				
	Э4АА	0,42; 0,5	14400	15500	16600	18700	1,45	3,3				
	Э4	0,3; 0,35	14400	15500	16600	18700	1,45	3,4				
	Э4А	0,3; 0,35	14400	15500	16600	18700	1,3	3,2				
	Э4АА	0,3; 0,35	14400	15500	16600	18700	1,2	2,9				

к ухудшению магнитных свойств: уменьшается проницаемость, увеличивается коэрцитивная сила, повышается значение удельных потерь. Поэтому детали для магнитных систем, где указанные параметры играют важную роль, подвергают после механической обработки — термической. Для каждого вида материала применяется особый режим термической обработки. Ниже приводятся данные режимов обработки некоторых материалов.

Железо Армко — отжиг при 900° с последующим медленным охлаждением.

Листовая электротехническая сталь — отжиг производится или в сухом чистом песке или в печи с защитной газовой средой (водород, чистый азот и др.). Температура отжига 720—780°, выдержка — 1—1,5 часа, охлаждение в печи до 200—250° со скоростью не выше 40 — 60° в час, при температуре ниже 200—250° детали могут остывать вне печи.

Пермаллой — отжиг в печи с защитной газовой средой (водород), температура 1100°, 3 часа, охлаждение до 200° со скоростью 50° в час.

Пермендюр — отжиг при 1000°, 50 часов, охлаждение 100° в час до 200°.

1-5. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При выборе материала для магнитной системы учитывают, с одной стороны, требования, предъявляемые к магнитной системе, с другой — качество материала и его стоимость.

Системы постоянного тока. Наиболее ходким материалом является железо Армко, марки Э. В простых конструкциях реле, например, в первичных реле управления, железо Армко может быть заменено более дешевым материалом — конструкционной сталью. В реле времени с магнитным демпфером сердечники выполняют из круглой кремнистой стали. Для высокочувствительных, быстродействующих реле применяют материалы с высокой начальной проницаемостью — пермаллой, реже пермендюр.

Особое значение придается выбору материалов для магнитных систем автоматических регуляторов. Точность работы регулятора определяется разницей между кривыми намагничивания и размагничивания системы. Для уменьшения этой разницы применяют материалы с весьма малой коэрцитивной силой: пермаллой, ХВП.

1-6. ИСПОЛНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТОПРОВОДОВ

Различают два основных вида магнитопроводов:

1) *сплошные*, изготовляемые из полосового или круглого материала — конструкционной стали, железа Армко, круглой кремнистой стали;

2) *шихтованные* части магнитопровода представляют собой склепанные пакеты из листового материала толщиной 0,3—0,5 *мм* — листовой электротехнической стали, пермаллоя, ХВП.

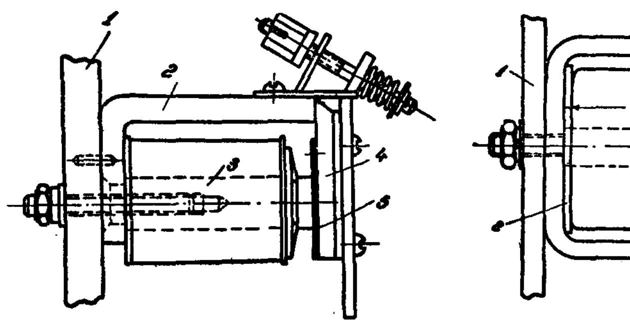
Как правило, реле постоянного тока имеют магнитопровод из сплошного материала, а реле переменного тока — шихтованный магнитопровод. Иногда, однако, отступают от этого общего правила. Так, магнитные системы постоянного тока исполняются с шихтованным магнитопроводом в тех случаях, когда требуется построить быстродействующее высокочувствительное реле или магнитную систему регулировочного реле, где необходимо применить материал с малыми значениями коэрцитивной силы и малыми потерями на вихревые токи (такие материалы изготовляют обычно в виде листов). Такое же положение имеет место при исполнении прямоходовых систем, когда изготовление шихтованной системы, состоящей из отдельных жестей, получаемых процессом штамповки, дешевле и проще магнитной системы из сплошного материала.

В отдельных случаях магнитопровод небольших реле переменного тока изготовляется из сплошного материала толщиной 2—3 *мм* (например, из кремнистой стали). В таких системах получаются повышенные потери на вихревые токи, но поверхность охлаждения катушки принимается несколько бо́льшей, чем у обычных исполнений, и значение температуры перегрева не выходит за пределы норм.

а) **Сплошной магнитопровод** состоит из следующих основных частей: сердечника, на который насаживается катушка, подвижного якоря (или плунжера) и ярма, на которое крепятся все части реле.

Сердечник обычно изготовляется из круглого материала; особое внимание уделяют креплению сердечника к ярму. Этот узел требует тщательного изготовления, так как при плохой пригонке деталей магнитное сопротивление в месте перехода получается значительным.

Наиболее рационально крепить детали наглухо легкой прессовой посадкой или расклепкой конца сердечника в скобе (фиг. 1, 5), однако, встречается и неглухое крепление сердечника (фиг. 1, 6).



Фиг. 1, 5. Магнитопровод с расклепанным сердечником:

1 — плита; *2* — скоба, *3* — сердечник; *4* — якорь; *5* — немагнитная прокладка.

Фиг. 1, 6. Магнитопровод:

1 — плита; *2* — шайба.

Полюсный наконечник. В системах постоянного тока с поворотным якорем рекомендуется применение полюсных наконечников, благодаря которым увеличивается проводимость рабочего воздушного зазора.

Фиг. 1, 7. Крепление полюсного наконечника: *а* — с витой пружиной; *b* — с пружинной шайбой. *1* — полюсный наконечник; *2* — витая пружина; *3* — пружинная шайба.

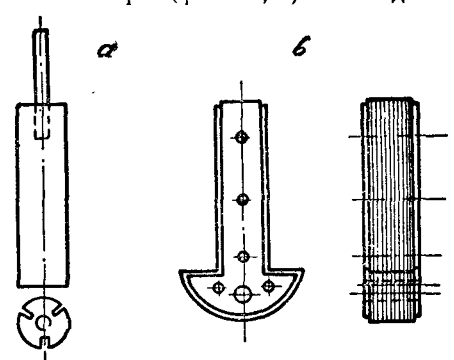
Если для смены катушки возможно снять все реле и отвинтить сердечник, последний вытачивается заодно с полюсным наконечником (фиг. 1, 6). Если же по условиям эксплуатации съем реле с панели для смены катушки неудобен, ставят отдельный полюсный наконечник (фиг. 1, 7), который скрепляется с сердечником посредством винта с потайной головкой. Для предотвращения самоотвинчивания этого винта применяют пружины: плоские из фосфористой бронзы или винтовые из стальной проволоки.

Якорь. В реле с поворотным якорем якорь исполняется из полосового материала; в прямоходовых — из круглого. В быстродействующих реле для уменьшения вихревых токов в круглом сердечнике делают прорезы (фиг. 1, 8*а*).

В реле с поворотным якорем вращение якоря осуществляется реже на оси, чаще на призме (фиг. 1, 5), что дает лучшее конструктивное решение. В прямоходовых реле направляющей для поступательного движения якоря служит латунная трубка, помещаемая внутри катушки (фиг. 1, 9).

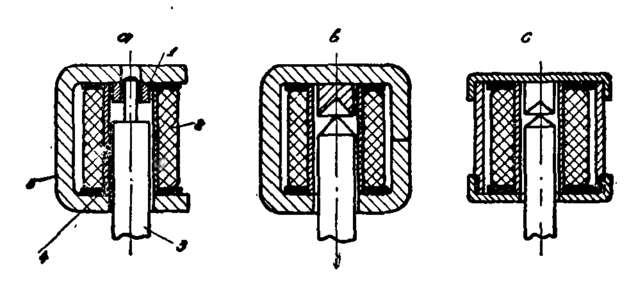
В реле с поперечным движением якоря (фиг. 1, 6) последний крепится на пружинах.

Немагнитная прокладка. Для предохранения якоря от залипания вследствие остаточного потока в системе, необходимо выполнять магнитопровод так, чтобы при притянутом якоре оставался некоторый немагнитный зазор. Величина немагнитных зазоров между отдельными частями магнитопровода: в стыках между сердечником и ярмом, якорем и сердечником, якорем и ярмом, определяемая неплотностью прилегания (приближенно по 0,05 *мм* на стык), а также слоем цинкового покрытия (порядка 15—20 μ на деталь), считается достаточной для обычного исполнения реле постоянного тока.



Фиг. 1, 8. Якорь реле прямоходового типа: *а* — постоянного тока; *b* — переменного тока.

В реле времени с магнитным демпфером, а также реле с повышенным коэффициентом возврата ставят дополнительные немагнитные прокладки из латуни или бронзы. В магнитопроводе с приставным полюсным наконечником немагнитная прокладка располагается между полюсным наконечником и сердечником.



Фиг. 1, 9. Магнитопровод прямоходовых систем:
1 — стоп; 2 — катушка; 3 — якорь; 4 — латунная трубка; 5 — скоба.

В других случаях (фиг. 1, 5) немагнитная прокладка в виде прямоугольной пластинки прикрепляется двумя винтами к якорю. Прокладка эта в реле времени в зависимости от требуемой выдержки времени бывает толщиной от 0,1 до 0,3 *мм*. Прокладки меньшей толщины ($<$ 0,1 *мм*) исполняют в виде биметаллических пластинок — сталь — бронза, благодаря чему увеличивается стойкость прокладки и она не расклепывается при ударах якоря о сердечник.

В магнитопроводе (фиг. 1, 6) при притянутом положении якоря должен быть оставлен небольшой зазор (порядка 0,1—0,2 *мм*) между якорем и полюсным наконечником.

Крепление катушки. Наиболее простое крепление катушки получается при наличии полюсного наконечника (фиг. 1, 6, 1, 7). Размер *А* обычно выдерживается точно, с допуском $\pm$ 0,3 *мм*, размер же катушки по высоте может иметь отклонения порядка $\pm$ 2 *мм*. Для компенсации получающейся разницы в размерах ставят дополнительные шайбы из электрокартона. При исполнении без полюсного наконечника приходится ставить дополнительные пружинные шайбы из фосфористой бронзы (фиг. 1, 5), прижимающие катушку. Шайба вставляется в выточку сердечника и имеет вырезы для съема.

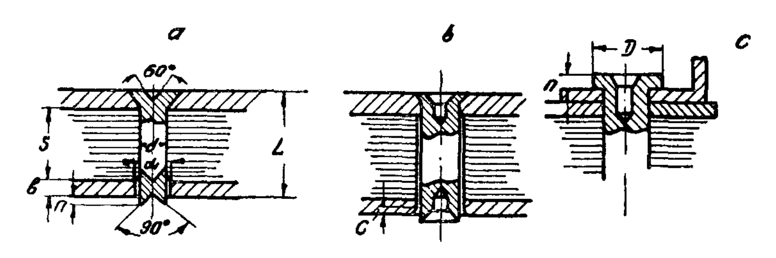
Ярмо. В реле с поворотным якорем ярмо исполняется в виде буквы Г (фиг. 1, 5) или в виде буквы П (фиг. 1, 6); в прямоходовых — в виде скоб (фиг. 1, 9) или в виде трубы.

Крепление магнитопровода. Скобка магнитопровода крепится к плите посредством винта, который завинчивается в сердечник (фиг. 1, 5) и закрепляется дополнительным штифтом от проворачивания.

Иногда сердечник магнитопровода для крепления заканчивается нарезанной частью (фиг. 1, 6). На фигуре 1, 27 показан способ крепления магнитопровода двумя винтами, завинчиваемыми в скобу. При исполнении открытых соленоидов наружные шайбы металлического каркаса делают утолщенными и к ним привинчивают угольники для крепления (фиг. 1, 21).

б) Шихтованный магнитопровод. *Пакет.* Пакет состоит из набора отдельных штампованных жестей толщиной 0,3—0,5 *мм*. Скрепление пакета осуществляется заклепками, реже винтами. Заклепки располагают так, чтобы было обеспечено плотное прилегание жестей пакета по всей его длине, обращая особое внимание на расположение заклепок у концов пакета, где жести стремятся разойтись в виде веера. Заклепки следует располагать по одной линии пакета (средней) во избежание образования замкнутого контура, создающего дополнительные потери на вихревые токи.

Расстояние между отверстиями заклепок должно быть выдержано с допуском порядка $\pm 0,1$, $\pm 0,2$ *мм*. Диаметр отверстия под заклепку должен быть несколько больше диаметра заклепки (фиг. 1, 10).



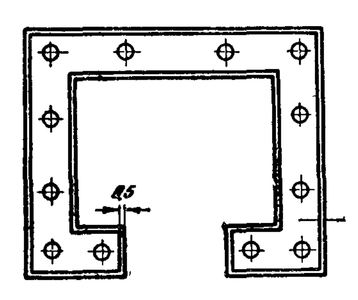
Фиг. 1, 10. Заклепочные соединения для магнитных систем.

Фиг.	d	d_1	D	*в* мин.	*c*	L	*n*
a	2	2,2	—	1	0,7		1
a	3	3,2	—	1	0,7		1
в, c	4	4,5	8	1,5	1	1	3
в, c	5	5,2	9	1,5	1,5	2	3

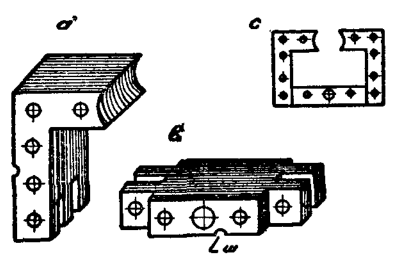
Допуск на отверстие под штифт в жестях — A_1.

В ряде случаев для увеличения жесткости пакета наружные жести пакета штампуются из более толстого материала, чем основные (чаще всего толщиной 1 *мм*). Для наружных жестей требуется специальный штамп. Рекомендуется поэтому размеры наружной жести уменьшать по контуру на 0,5 *мм* (фиг. 1, 11), чтобы она не выступала из пакета в случае неточного совпадения ее размеров с основной.

Сложные пакеты. В конструкциях магнитопроводов сложной формы (фиг. 1,12) пакеты исполняют разборными, чтобы можно



Фиг. 1, 11. Габариты наружных жестей.



Фиг. 1, 12. Конструкция сложного пакета:
a, b — отдельные пакеты; *c* — собранная система; *ш* — штамповальный знак.

было надевать катушку. Отдельные собранные пакеты свинчиваются винтами. Для каждого вида пакетов требуется две жести — одна нормальной длины, другая укороченная.

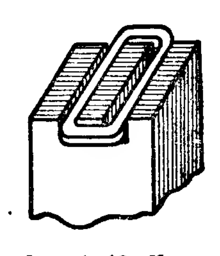
Набор пакета. Согласно требованиям ГОСТ 802—41 допуск по толщине для электротехнической стали может быть порядка ±10% и при сборке пакета строго по числу жестей могут получиться значительные отклонения в размерах толщины пакета. Рекомендуется поэтому в чертежах указывать не только число жестей, но и вес пакета. В производстве пакет собирают не по числу жестей, а по весу. При определении числа жестей и веса пакета следует учитывать коэффициент заполнения пакета, который зависит от способа изолирования жестей и колеблется в пределах 0,9—0,95.

Склепка пакета. Небольшие пакеты склепываются вручную — в ручном прессе. Пакеты для больших магнитных систем, например для контакторов, необходимо дополнительно подвергнуть прессовке в гидравлических прессах.

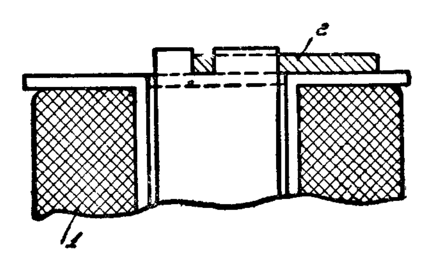
Штамповальный знак. При изготовлении штампа для жестей в нем предусматривается выштамповка так называемого знака, обычно в виде полукруга (фиг. 1, 12). Знак указывает направление штамповки при сборке пакета. Другое назначение знака — отличать жести, изготовленные одним штампом; допуски на размеры жестей и расстояния между отверстиями в них не могут быть выдержаны при изготовлении штампов с достаточно большой

точностью. Рекомендуется собирать пакет из жестей, изготовленных одним и тем же штампом; знак располагается в каждом отдельном штампе в разных местах.

Экран. Экраны, применяемые для устранения вибрации в магнитной системе, выштамповывают из полосового материала: латуни, алюминия, реже из меди. Для крепления экрана в магнитопроводе делаются прорезы. В простейшем случае экран укрепляется в торце магнитопровода и удерживается в нем благодаря плотной посадке (фиг. 1, 13 и 1, 14).



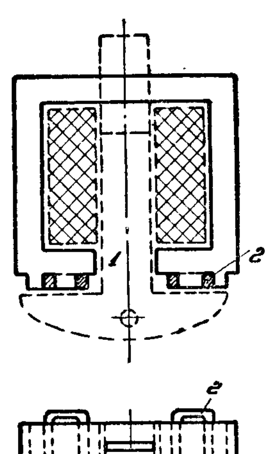
Фиг. 1, 13. Крепление экрана.



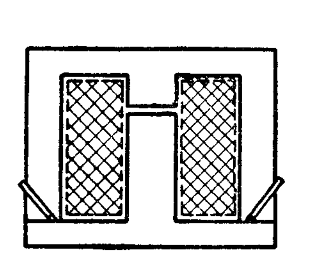
Фиг. 1, 14. Крепление экрана: 1 — катушка; 2 — экран.

Для уменьшения электрического сопротивления и увеличения поверхности охлаждения экрана (фиг. 1, 14) наружная часть его может иметь увеличенные размеры. Установка экрана в прямоходовых системах показана на фигурах 1, 15 и 1, 16, в *Е*- и Ш-образных системах — на фигуре 1, 17.

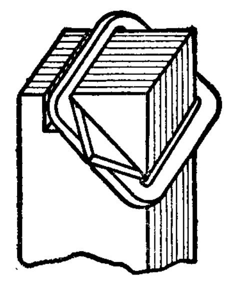
В последнем случае экран свободно входит в пазы магнитопровода и удерживается от выпадения благодаря тому, что его отгибают после вставления в пазы; в других исполнениях для удержания витка отгибают крайнюю жесть.



Фиг. 1, 15. Шихтованный магнитопровод прямоходовой системы: 1 — якорь; 2 — экран.

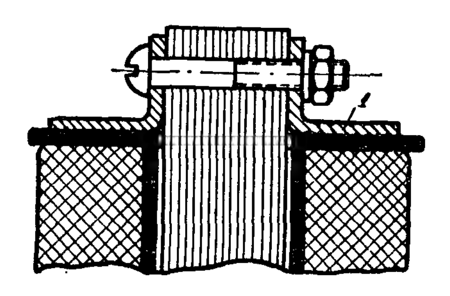


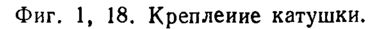
Фиг. 1, 16. Шихтованный магнитопровод прямоходовой системы.

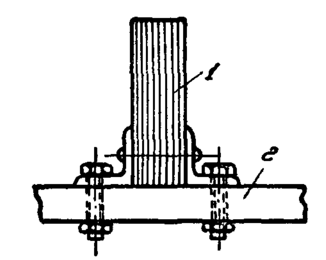


Фиг. 1, 17. Крепление экрана.

Вращение якоря обычно осуществляется на осях. Якорь должен свободно ложиться на торцы сердечника и ярма, так как при малейшем перекосе якоря в притянутом положении могут образоваться большие воздушные зазоры, влекущие за собой возрастание намагничивающего тока и нагрева катушки. В реле с поворотным якорем отверстие в якоре делают несколько больше диаметра оси, в прямоходовых — внутренние размеры направляющей металлической гильзы несколько больше размеров якоря (плунжера), благодаря чему он свободно устанавливается в своем конечном положении так, что образуются минимальные воздушные зазоры между ним и торцом магнитопровода.




Фиг. 1, 18. Креплеиие катушки.



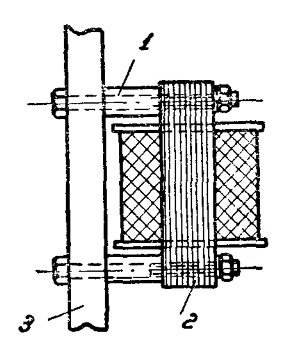
Фиг. 1, 19. Крепление шихтоваиного магнитопровода:
1 — магнитопровод; 2 — плита.

Крепление катушки. В простейшем случае для небольших реле, если температура перегрева относительно невелика (50—60°), катушка удерживается в требуемом положении экраном (фиг. 1,14). В магнитных системах, где требуется частая смена катушки, последняя крепится специальными угольниками (фиг. 1, 18).

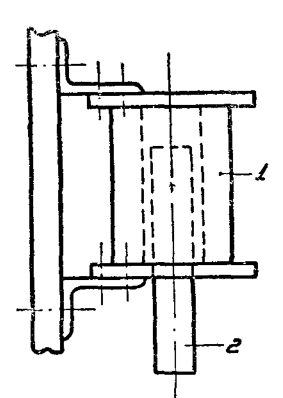
Крепление магнитопровода к основанию реле осуществляется в реле с поворотным якорем посредством дополнительных угольников, приклепываемых или привинчиваемых к ярму (фиг. 1, 19).

Магнитопровод прямоходовых систем крепится к основанию посредством винтов с надетыми на них распорными трубками (фиг. 1, 20). В некоторых случаях вместо трубок ставят дополнительные гайки. В прямоходовых системах без наружного стального магнитопровода — соленоидах — каркас катушки делается металлическим, шайбы его утолщаются, чтобы к ним можно было привинтить крепящие угольники (фиг. 1, 21).

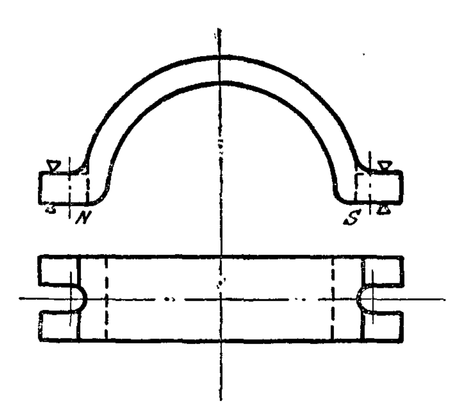
в) Магнитопровод с постоянными магнитами. При конструировании поляризованных реле с постоянными магнитами особое внимание должно быть уделено форме крепления этих магнитов. Магниты из вольфрамовой или хромистой стали, которые до закалки поддаются механической обработке (фрезеровке, сверлению), могут прикрепляться к остальным частям магнитопровода посредством винтов.



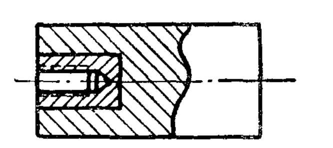
Фиг. 1, 20. Крепление шихтованного магнитопровода прямоходовой системы:
1 — трубка; 2 — магнитопровод; 3 — плита.



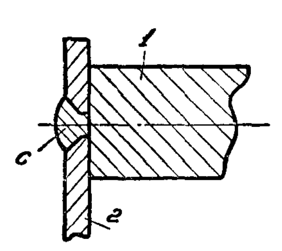
Фиг. 1, 21. Крепление соленоидов:
1 — катушка; 2 — якорь.



Фиг. 1, 22. Крепление постоянного магнита.



Фиг. 1, 23. Крепление постоянного магнита.

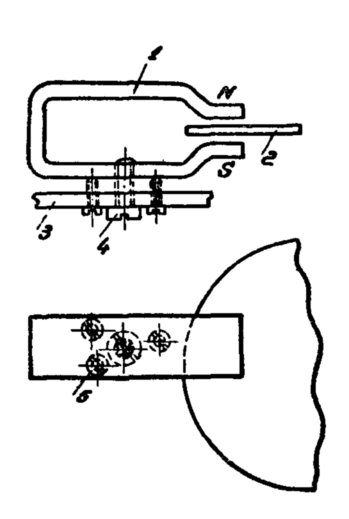


Фиг. 1, 24. Крепление постоянного магнита к стальной пластинке:
1 — магнит; 2 — пластинка.

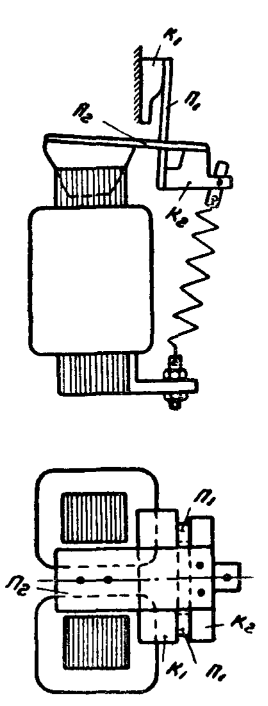
Хорошее конструктивное решение при материалах, не поддающихся механической обработке, получается исполнением магнита согласно фигуре 1, 22. При отливке такого магнита предусматривают открытые пазы для крепящих винтов. Другая форма крепления магнитов из высококоэрцитивных сплавов: в отливке постоянного магнита предусматривается канавка, которая затем прошлифовывается.

Магнит крепится к другой детали магнитопровода скобой из латуни.

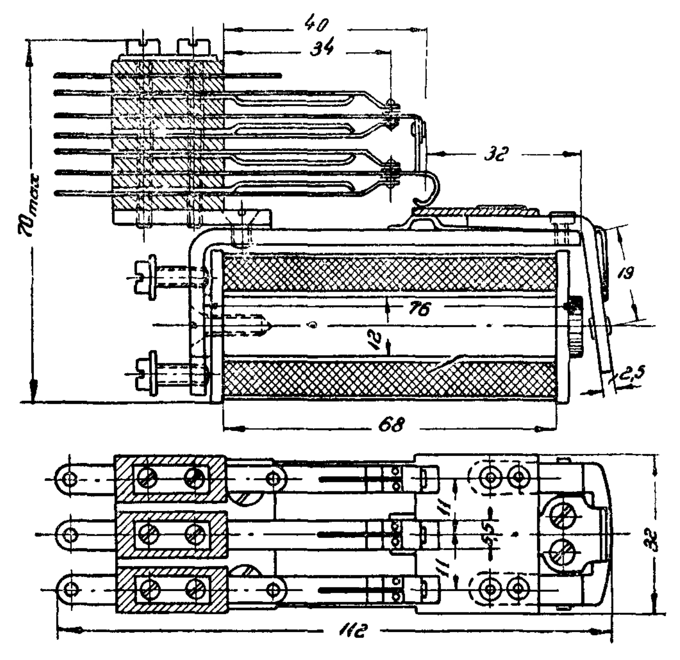
Прямые магниты прямоугольного или круглого сечения (фиг. 1, 23) отливают со вставкой из магнитномягкого материала, в которой делается нарезка для ввинчивания крепящего винта. На наших заводах производят опыты по приварке постоянных магнитов к пластинкам из магнитномягких материалов (фиг. 1, 24): в пластинке просверливают отверстие с зенковкой и в этом месте приваривают деталь к магниту дуговой сваркой. При устройстве крепления тормозных постоянных магнитов необходимо предусматривать возможность регулирования положения магнита по отношению к диску. Для этой цели применяют четыре винта (фиг. 1,25). Центральный винт является крепящим, а три винта, ввинчиваемые в латунную пластинку, центрируют положение магнита.



Фиг. 1, 25. Крепление постоянного магнита с центрировкой его положения.



Фиг. 1, 26. Магнитопровод реле с поперечным движением якоря.



Фиг. 1, 27. Конструкция кодового реле.

На фигуре 1,26 приведен эскиз магнитопровода реле с поперечным движением якоря; на фигуре 1,27 — конструкция кодового реле.

ГЛАВА 2

КАТУШКИ

2-1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Катушка является одним из основных элементов реле. Правильная и надежная работа реле, его конструктивные данные в значительной степени зависят от принятых размеров катушки и от ее исполнения. В процессе работы реле в катушке возникают различные напряжения:

механические — в катушках переменного тока витки подвергаются действию электромагнитных сил притяжения или отталкивания переменного значения; такое же явление имеет место в катушках реле постоянного тока при переходных процессах включения и отключения катушки;

термические — возникающие из-за перегревов, определяемых повышенным напряжением или током;

электрические — образующиеся из-за перенапряжений, возникающих в цепи катушки.

Требования, предъявляемые к катушке, коротко формулируются следующим образом:

катушка должна быть минимальных габаритов и удобна для производства;

катушка должна быть механически прочной;

катушка не должна перегреваться при всех возможных режимах сверх предельно-допустимой температуры;

катушка должна выдерживать определенное испытательное напряжение с целью проверки диэлектрической прочности изоляции.

при некоторых специальных режимах катушка должна отвечать требованиям влаго-, кислото- и маслостойкости, стойкости против воздействия разных химических реагентов.

В зависимости от конструктивного исполнения различают катушки:

каркасные, в которых намотка осуществляется на каркасе;

бескаркасные бандажированные — с намоткой непосредственно на съемном шаблоне; после намотки катушка бандажируется;

бескаркасные — с намоткой на сердечнике магнитной системы;

бескаркасные небандажированные.

2-2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАМОТКИ КАТУШЕК

В качестве материала намотки применяют, как правило, медную проволоку. Алюминиевая проволока, ввиду ее большого удельного сопротивления, в релестроении не применяется. Обычно применяется проволока круглая, диаметром от 0,1 до 3 *мм*, квадратная — при требуемом сечении, превышающем 10 *мм*^{2}, и в некоторых случаях — полосовая медь. Проволоку диаметром меньше 0,1 *мм* применять избегают, так как она часто разрывается при намотке.

а) Изоляция провода. Намоточная проволока может иметь изоляцию разных видов.

Хлопчатобумажная представляет собой изоляцию относительно низкого качества, гигроскопичную. Толщина ее относительно велика. Проволока выпускается с одним слоем хлопчатобумажной изоляции (ПБО) и с двумя слоями (ПБД).

Шелковая изоляция является более совершенной, она обладает большей диэлектрической прочностью, чем хлопчатобумажная. Толщина шелковой изоляции меньше толщины хлопчатобумажной.

Выпускается проволока с одним слоем шелковой изоляции (ПШО) и с двумя (ПШД).

Эмалевая состоит из эмаль-лаков на масляной или глифталевой основе. Качество эмалевой изоляции выше, чем хлопчатобумажной и шелковой Она тоньше их и обладает большей теплопроводностью и большей теплостойкостью. Пленка изоляции имеет хорошую влагостойкость и механическую прочность. К недостаткам эмалевой изоляции следует отнести наличие в ней ряда мелких, невидимых простым глазом, поврежденных точек, вследствие чего в намотке катушки возможны случаи образования короткозамкнутых витков. По ГОСТ 2773—44 допускается следующее число точек повреждения эмали на длине 15 *м*:

Марка	Диаметр проволоки от 0,05—0,14 *мм*	Диаметр проволоки от 0,15—0,35 *мм*
ПЭЛ-1	15	10
ПЭЛ-2	25	20

Комбинированная изоляция состоит из двух слоев разной изоляции. Существуют следующие марки комбинированной изоляции:

ПЭБО — слой эмали и слой хлопчатобумажной изоляции;

ПЭШО — слой эмали и слой шелковой изоляции;

ПЭТО — комбинированная эмалевая и теплостойкая изоляция.

Винифлекс является синтетической изоляцией, дающей тонкое покрытие, обладающее высокой механической прочностью. Проволока исполняется с одно-, двух- и трехслойным покрытием винифлекса.

Средняя радиальная толщина изоляции:

ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭВ-3
0,02 *мм*	0,03 *мм*	0,05 *мм*

Провода со стеклянной и дельта-асбестовой изоляцией не применяются в релестроении.

Градация диаметров медной проволоки по ГОСТ 2773—44 приведена в таблице 2.

б) Выбор изоляции. При выборе изоляции намоточного провода принимается во внимание ряд факторов.

Механическая прочность. В отношении механической прочности все указанные виды изоляции удовлетворяют требованиям, предъявляемым к намоточной меди, за исключением эмалевой изоляции, механическая прочность которой недостаточна при относительно больших диаметрах проволоки.

Таблица 2

Проволока медная эмалированная[1]

Диаметры, *мм*[2]							
голой меди	с эмалевой изоляцией	голой меди	с эмалевой изоляцией	голой меди	с эмалевой изоляцией	голой меди	с эмалевой изоляцией
0,05	0,065	0,20	0,225	0,51	0,560	1,00	1,070
0,06	0,075	0,23	0,255	0,55	0,600	1,08	1,155
0,07	0,085	0,25	0,275	0,59	0,640	1,16	1,235
0,08	0,095	0,27	0,305	0,64	0,690	1,25	1,330
0,09	0,105	0,29	0,325	0,69	0,740	1,35	1,430
0,10	0,120	0,31	0,350	0,74	0,800	1,45	1,530
0,11	0,130	0,35	0,390	0,77	0,830	1,50	1,580
0,12	0,140	0,38	0,420	0,80	0,860	1,56	1,640
0,14	0,160	0,41	0,450	0,83	0,890	—	—
0,15	0,170	0,44	0,485	0,86	0,920	—	—
0,16	0,180	0,47	0,515	0,93	0,990	—	—
0,18	0,200	—	—	—	—	—	—

Примечания:

[1] Имеются следующие марки медиой эмалированиой проволоки: ПЭЛ-1 и ПЭЛ-2 — лакостойкая, изоляция иа масляной основе, ПЭТ — та же проволока, но повышенной теплостойкости, изоляция на глифталевой основе, изготовляется диаметром от 0,33 *мм* и выше.

[2] Эмалированная проволока тоньше 0,05 *мм* изготовляется по особым техническим условиям.

Диэлектрическая прочность. Наилучшие данные по диэлектрической прочности имеет стеклянная изоляция, затем эмалевая и хромоксидная. Для получения необходимой диэлектрической прочности шелковой и хлопчатобумажной изоляции требуется применять двойную изоляцию (ПШД, ПБД).

Теплостойкость. Изоляция из шелка и хлопчатобумажная относятся к классу О и для повышения теплостойкости этой изоляции необходимо подвергнуть ее пропитке. Эмалевая и винифлексная изоляция относятся к классу А, хромоксидная — к классу В. Весьма высокой теплостойкостью обладает изоляция из стеклянной пряжи, но она гигроскопична, и ее приходится подвергать пропитке. При пропитке органическими лаками предельная допустимая температура для такой изоляции — 120°, а при пропитке кремнеорганическими смолами повышается до 175° и больше.

Химическая стойкость. Высокой химической стойкостью и стойкостью против большинства технических реагентов обладает

изоляция эмалевая, винифлексная и из стеклянной пряжи. Для повышения стойкости шелковой и хлопчатобумажной изоляции требуется дополнительная их пропитка.

Стоимость. Ниже приводятся сравнительные данные стоимости разных видов изоляции: Э—1; ШО—2,8; ШД—4,3; БД—4,0; ЭШО—3,8.

Толщина изоляции. Для получения высоких коэффициентов заполнения стремятся к применению изоляции с минимальной толщиной (см. таблицу 3).

Таблица 3

Толщина изоляции обмоточных проводов

Марка провода	Диаметр проволоки в *мм*								
	0,05 до 0,09	0,10 до 0,19	0,20 до 0,25	0,27 до 0,29	0,31 до 0,38	0,41 до 0,49	0,51 до 0,69	0,72 до 0,96	1,00 до 1,45
ПЭЛ1, ПЭЛ2, ПЭТ	0,015	0,020	0,025	0,03	0,04	0,045	0,05	0,06	0,07
ПЭЛ ШО	0,07	0,075	0,09	0,1	0,105	0,110	0,115	0,125	0,138
ПЭЛ БО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27

Дефицитность. Наименее дефицитной является проволока с эмалевой изоляцией. В практике релестроения наиболее часто применяют проволоку с эмалевой изоляцией при намотке катушек проволокой до 0,9 *мм*. При бо́льших диаметрах проволоки применяют изоляцию БД.

Катушки напряжения переменного тока часто исполняют с изоляцией ШД при желании осуществить намотку без бумажных прокладок. Для эмалевой изоляции прокладки в этом случае обязательны.

2-3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При изготовлении каркасных и бескаркасных катушек применяют разного вида вспомогательные изоляционные материалы, служащие для изготовления каркасов, дополнительной их изоляции, изоляции выводов, наружных слоев намотки, бандажировки катушек, изоляции между слоями намотки. В таблице 4 приводятся краткие технические данные таких изоляционных материалов.

Изоляционные материалы

Наименование	Толщина, *мм*		Пробивная напряженность *кв/мм* или пробивное напряжение, *кв*	Удельный вес	Примечания
	Размер	Допускаемое отклонение			
Электрокартон марки ЭВ (электропрессшпан)	0,1; 0,15; 0,2; 0,3 0,4; 0,5 1; 1,25 1,5; 1,75; 2; 2,5; 3	±0,015 ±0,3	11 *кв/мм* 7,5 *кв/мм*	от 1,5 до 0,95	Вырабатывается из целлюлозы и льняного волокна. Рекомендуется пропитка лаком
Гетинакс	0,5; 0,6 0,8; 1,0 1,2; 1,5 2 2,5; 3,0; 3,5	+0,15 −0,03 ±0,1 ±0,12 −0,15 +0,15 −0,2 ±0,2	15—23 *кв* 30—42 *кв* 40—55 *кв*	1,3—1,4	Слоистый диэлектрик из бумаги, обработанной бакелитной смолой при нагреве и под давлением
Текстолит листовой	0,5; 0,6; 0,8; 1,0 1,5 2 2,5; 3,0; 3,5	±0,1 ±0,15 ±0,2 ±0,25	до 1 *мм* 3,5 *кв/мм* от 1 до 2 *мм* 3 *кв/мм* от 2 до 3 *мм* 2 *кв/мм*	1,3—1,4	Аналогичен гетинаксу, но с заменой бумаги текстильным материалом
ЛШ 1 Лакоткань шелковая	0,1 0,15	±0,015 ±0,02	2,1 *кв* 3,0 *кв*		Шелк, пропитанный лаком, светлым или черным
ЛХ 1 Лакоткань хлопчатобумажная	0,15; 0,17; 0,20 0,24;	±0,02 ±0,03	0,9—1,4 *кв*		Ткань, пропитанная лаком
Миканит прокладочный	0,5; 0,6 0,7; 0,8 0,9; 1,0 1,5; 2,0 2,5; 3,0		15—20 *кв/мм*		Слои щипаной слюды, склеенные изоляционными лаками с последующей опрессовкой

Наименование	Толщина, *мм* Размер	Допускаемое отклонение	Пробивная напряженность *кв/мм* или пробивное напряжение, *кв*	Удельный вес	Примечания
Микалента	0,08 0,10 0,13 0,17	±0,01 ±0,01 ±0,02 +0,03 —0,02	от 20 *кв/мм* до 14 *кв/мм*		Гибкая лента, состоящая из одного слоя щипаной слюды, склеенной с бумагой
Микафолий	0,15 0,20	+0,02 —0,03 +0,04 —0,03 ±0,05	Не менее 13—16 *кв/мм*		Состоит из нескольких слоев щипаной слюды, наклеенных на бумагу
Бумага: конденсаторная пропиточная телефонная кабельная	От 0,007 до 0,0024 0,12 0,05 0,08 0,12 0,17	 ±0,01 ±5% ±0,005 ±0,007 ±0,01	От 275 до 450 *кв*	0,97 0,65 0,82 0,7	
Лента: киперная тафтяная	0,45 0,25	+0,02 +0,02			Хлопчатобумажная
Линоксиновые трубки	Номинальный внутренний диаметр, *мм* 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3; 3; 5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12	±10—30%	1000—1200 *в*		Плетеные чулки из хлопчатобумажной, шелковой или стеклянной пряжи, пропитанные светлым изоляционным лаком

В последнее время разработаны новые виды изоляционных материалов, весьма теплостойких:

Стеклолакоткань — лакоткань на комбинированной глифталевой и асфальто-масляной основе. Толщина изоляции 0,2—0,3 *мм*, класс изоляции В.

Стекломиканит — гибкий теплостойкий электроизоляционный материал толщиной 0,2—0,5 *мм*, состоящий из одного или

двух слоев тонкой стеклоткани и одного или нескольких слоев щипаной слюды, склеенных высокотеплостойким лаком.

Стеклослюдяная лента — гибкая теплостойкая изоляция толщиной 0,18—0,25 *мм*.

Стеклотканевые трубки и стеклошнур.

Эти новые виды изоляционных материалов применяются для изоляции катушек, намотка которых исполнена из проволоки с теплостойкой изоляцией.

2-4. НАМОТОЧНЫЕ СТАНКИ

При выборе типа катушки и расчете ее необходимо учитывать конструкцию намоточного станка, на котором эта катушка изготовляется. К намоточным станкам предъявляются следующие требования:

1. Проволока должна укладываться точно: один ряд за другим. В противном случае в намотке образуются бугры, узлы и впадины, что приводит к уменьшению полезного объема катушки.

2. Скорость вращения станка и скорость подачи проволоки должны соответствовать размеру проволоки. Станок должен быть поэтому снабжен устройствами для регулировки числа оборотов шпинделя и подачи.

3. Натяжение проволоки при намотке должно быть определенным, не превышающим предельно допустимого. При повышенном натяжении возможны растягивание проволоки и частые разрывы ее.

4. Станок должен иметь приспособление для автоматической прокладки бумаги между слоями проволоки.

5. При всяком обрыве проволоки станок должен немедленно останавливаться.

6. Станок должен допускать возможность одновременной намотки нескольких катушек.

7. Станок должен быть снабжен счетчиком оборотов. Желательно устройство счетчика, обеспечивающее установку на определенное число витков, по достижении которых станок автоматически останавливается.

Существуют станки следующих типов.

Намоточные автоматы, полностью удовлетворяющие перечисленным выше требованиям. Они снабжены устройствами автоматической подачи проволоки с регулировкой подачи. Величина натяжения проволоки регулируется пружинами. Станки снабжаются соответствующими счетчиками, приспособлениями для прокладки бумаги, для остановки станка при обрыве проволоки или по достижении требуемого числа оборотов. На намоточном автомате можно проводить одновременную намотку 8—10 катушек. Наматывать катушки можно проволокой от 0,05 до 0,5—0,6 *мм* диаметром. Коэффициент заполнения катушки получается высоким, число ее витков точно соответствует заданному.

Полуавтоматы отличаются от автоматов тем, что они не оборудованы полностью всеми названными выше приспособлениями: не снабжены устройством для автоматической прокладки бумаги, для остановки станка при обрыве. На полуавтомате осуществляется одновременная намотка только одной катушки. При работе на полуавтоматах можно получить катушки такого же качества, как и на автоматах, но при условии наличия квалифицированных рабочих и максимального внимания их к процессу намотки.

Ручные намоточные станки. В таких станках натяжение проволоки и подача ее осуществляются от руки. Как правило, при работе на ручных станках получается «дикая намотка» с беспорядочной укладкой рядов и слоев. На ручных станках производится намотка только каркасных катушек. Следует учитывать более низкий коэффициент заполнения, получающийся при ручной намотке.

Тормозные станки. Изготовление токовых катушек с проволокой больше 0,9 *мм* в диаметре связано с некоторыми особенностями процесса: намотка осуществляется при небольшом числе оборотов, за укладкой проводов должен следить непосредственно рабочий, причем приходится часто останавливать станок, давать ему обратный ход для повторной подгонки проволоки, в некоторых случаях приходится по ходу намотки закреплять проволоку хлопчатобумажной лентой, так как в бескаркасных катушках с толстой проволокой не применяется прокладка бумаги. Для намотки таких катушек применяются специальные станки, называемые тормозными.

Тормозные станки отличаются от обычных ручных намоточных станков в основном бóльшей мощностью двигателя, малым числом оборотов шпинделя, наличием тормозного и реверсирующего устройств.

2-5. КАРКАСНЫЕ КАТУШКИ

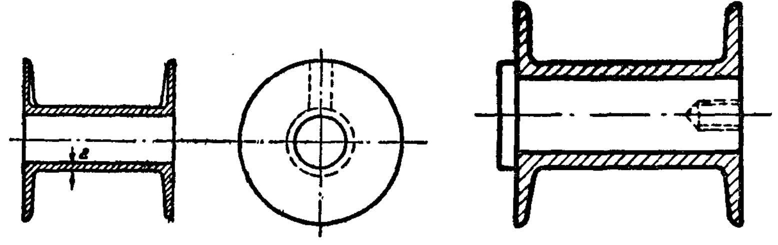
Намотка катушки осуществляется на заранее приготовленном каркасе. Различают следующие виды каркасов.

Прессованные каркасы из тенацита — порошка, состоящего из древесных опилок и бакелитовой смолы. Применение таких каркасов рационально при массовом выпуске изделия, когда стоимость прессформы для прессовки каркаса экономически оправдывается.

На фигуре 2, 1 показано примерное исполнение тенацитового каркаса. Отверстие для сердечника может быть круглым или прямоугольным. Толщина трубки и стенок каркаса, которую выбирают исходя из механических соображений, должна быть не менее 2 *мм*. Для облегчения съема прессованной детали с прессформы стенки каркаса имеют с внутренней стороны небольшой уклон $\left(\frac{1}{100}\text{ или }\frac{1}{50}\right)$. В этих же стенках выпрессовываются углубления для прокладки выводов (см. пунктир).

Фарфоровые каркасы, имеющие конструкцию, аналогичную тенацитовым.

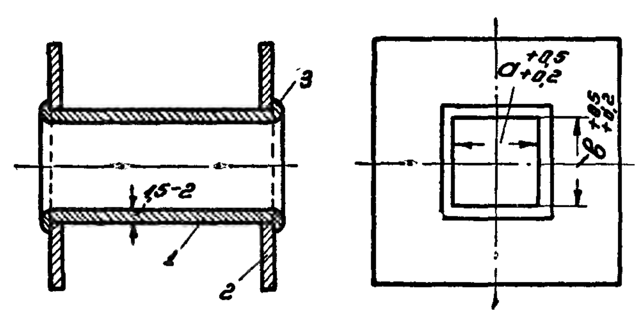
Для реле небольших размеров применяется конструкция тенацитового каркаса, опрессованного непосредственно на сердечник (фиг. 2, 2).



Фиг. 2, 1. Теиацитовый каркас.

Фиг. 2, 2. Тенацитовый каркас, опрессованный иа сердечиике.

Сборные каркасы из слоистой изоляции (фиг. 2, 3), состоящие из гетинаксовой трубки и шайб из гетинакса или текстолита. Трубка исполняется из гетинакса, изготовленного не на бакелитных, а на термореактивных неполимеризующихся лаках



Фиг. 2, 3. Сборный каркас

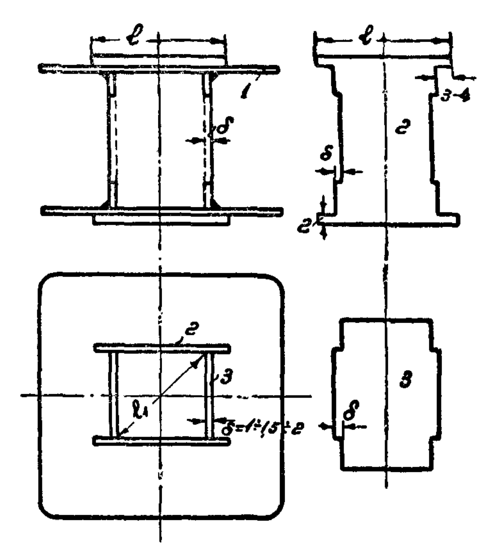
1 — изолит; 2 — текстолит; 3 — развальцевать.

(шеллак, глифталевый лак), благодаря чему трубка при нагреве под прессом может деформироваться.

Сборка каркаса осуществляется следующим образом: шайбы одеваются на трубку, и собранную конструкцию ставят в ручной пресс, где производится развальцовка трубки горячими пуансонами. В результате получается прочный, механически и электрически надежный каркас. Трубка исполняется так, чтобы внутренние размеры ее имели только положительный допуск порядка +0,5, +0.2 *мм*.

Удачная конструкция сборных каркасов, изготовляемых в последнее время на отечественных заводах, приведена на фигуре 2, 4. Каркас состоит из деталей, отштампованных из гетинакса толщиной 1—1,5 *мм* и для больших катушек — 2 *мм*. Деталь *2*

имеет выступы, которыми удерживаются щеки *1*. Размер l детали *2* должен быть несколько меньше размера l_1 по диагонали каркаса, благодаря чему осуществляется возможность надевания щек на деталь *2* по диагонали.



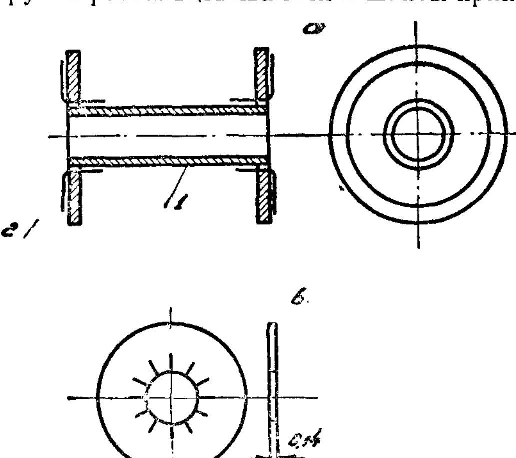
Фиг. 2, 4. Сборный каркас.

Наличие выступающих частей обеспечивает жесткость каркаса. После сборки каркаса углы между щеками и боковыми стенками заклеивают шеллачным лаком (или бакелитным с последующей запечкой).

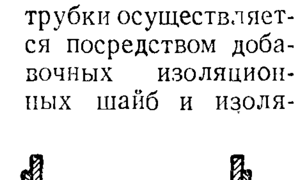
Клееные каркасы, в которых шайбы и трубки из электрокартона склеиваются посредством полотняных разрезных шайб или лент, расположенных по всей окружности каркаса (фиг. 2, 5, *a*). Клееные каркасы применяются только для редких, индивидуальных исполнений катушек. Эскиз заготовки шайбы показан на фигуре 2, 5, *b*.

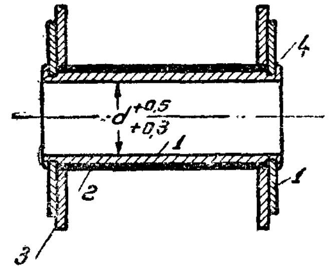
Металлические каркасы, исполняемые в виде латунной трубки с насаженными по краям латунными шайбами. Концы трубки развальцовываются и шайбы припаиваются к ней (фиг. 2, 6).

Изоляция намотки от трубки осуществляется посредством добавочных изоляционных шайб и изоля-



Фиг. 2, 5. Клееный каркас: *a* — каркас; *b* — заготовка шайбы;
1 — прессшпан; *2* — полотно.





Фиг. 2, 6. Металлический каркас:
1 — латунь; *2* — лакополотно; *3* — гетинакс или текстолит; *4* — припаять.

ционных полос из лакополотна или микаполотна, наматываемых на металлическую трубку. Перед изолировкой трубки рекомендуется замазывать изоляционным клеем углы между изоляционными шайбами и трубкой.

Примерные размеры элементов каркаса следующие:

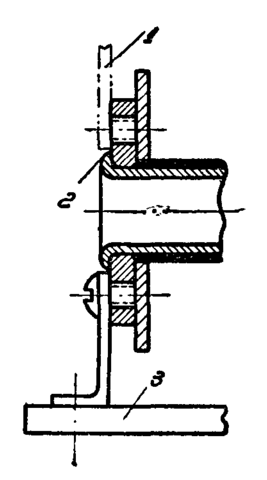
толщина трубки и шайб — порядка 0,5 *мм*;

толщина изоляционной шайбы — порядка 1 *мм*;

толщина изоляции трубки — порядка 0,4—0,5 *мм*.

Обычно трубку для каркасов изготовляют из полосовой или листовой латуни (спайка шва не обязательна). Для некоторых исполнений катушек удается подбирать готовые латунные трубки.

Металлические каркасы применяются в основном в конструкциях прямоходовых электромагнитных реле, в которых подвижный сердечник перемещается внутри катушки. Имеются конструкции соленоидных реле, в которых на металлическом каркасе крепятся конструктивные элементы реле: рычаги, контактные системы (фиг. 2, 7). В этих случаях наружные металлические шайбы каркаса должны иметь толщину, достаточную для крепления других деталей. Шайбы должны быть толщиной порядка 4 *мм*, трубка — толщиной 1 *мм*. Для катушек переменного тока трубка и шайбы металлического каркаса исполняются с разрезом в одном месте.



Фиг. 2, 7. Металлический каркас с утолщенными флянцами.

1 — деталь для крепления частей реле; 2 — припаять; 3 — плита.

Намотка каркасных катушек может быть осуществлена на любом намоточном станке. На катушках постоянного тока не делается добавочных бумажных прокладок между слоями. В ряде случаев за 2—3 слоя до конца намотки ставится прокладка из телефонной бумаги или лакополотна, благодаря чему скрадываются неровности всей намотки. При намотке катушек переменного тока из проволоки с эмалевой изоляцией рекомендуется ставить через каждый слой проволоки прокладки из изоляционной бумаги.

Имеются катушки с двумя отдельными обмотками, разделенными шайбами. Преимуществом таких катушек является уменьшение напряжения между двумя соседними слоями. При изготовлении таких катушек производится намотка одной половины, другая заполняется временной деревянной колодкой. Наружная поверхность готовых катушек покрывается полосой лакополотна, наматываемой с некоторым нахлестом для склеивания концов.

Описание крепления выводов приводится в параграфе 2-7.

Готовая катушка снабжается табличкой, в которой указываются данные катушки — рабочее напряжение, число витков, диаметр проволоки, сопротивление намотки при 20°.

2-6. БЕСКАРКАСНЫЕ КАТУШКИ

Изготовление катушки. Намотка бескаркасных катушек производится на временных разъемных металлических шаблонах, укрепляемых на валу намоточного станка. Наружные размеры шаблонов соответствуют внутренним размерам катушки. Различают два вида бескаркасных катушек· бандажированные и небандажированные. Наибольшее распространение имеют бандажированные катушки, обладающие после компаундировки значительной механической прочностью.

В магнитных системах постоянного тока в целях улучшения теплоотдачи исполняют иногда катушки, наматываемые непосредственно на сердечник или на железную трубку, которая одевается на сердечник магнитной системы.

В тех случаях, когда катушка в аппарате полностью защищена от внешних механических воздействий, например в реле с кожухом или в соленоидном реле с замкнутой магнитной системой, возможно применение небандажированных бескаркасных катушек.

Как правило, процесс изготовления бескаркасных катушек состоит из трех стадий:

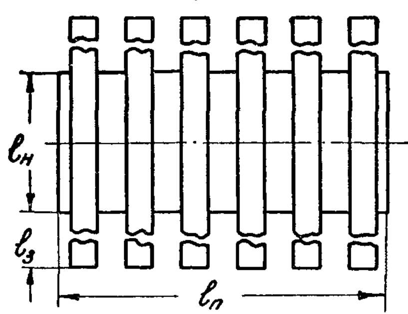
1) намотки катушки на станке;

2) бандажировки катушки после съема ее со станка;

3) компаундировки катушки.

Ниже коротко описываются первые две стадии изготовления катушки из различного обмоточного материала. Процесс компаундировки катушек рассматривается в параграфе 2-8.

Намотка и бандажировка бескаркасной катушки с эмалевой изоляцией. Процесс намотки состоит из следующих операций.



Фиг. 2, 8. Заготовка для бескаркасной катушки.

1. Заготовляется полоска из микаполотна, к которой приклеивают изоляционным клеящим лаком тафтяные ленты (фиг. 2, 8) с расстоянием между ними, равным их ширине. Длина полоски из микаполотна выбирается с таким расчетом, чтобы при наворачивании ее на шаблон получился нахлест порядка 10—15 *мм*; $l_п = \pi D_{вн} + (10-15)$ *мм*, ширина ее $l_н$ должна быть равна длине намотки. Длина тафтяных лент должна быть такой, чтобы ими можно было укрепить всю намотку катушки.

2. Полоска микаполотна наматывается на съемный шаблон, закрепленный на валу станка (фиг. 2-9).

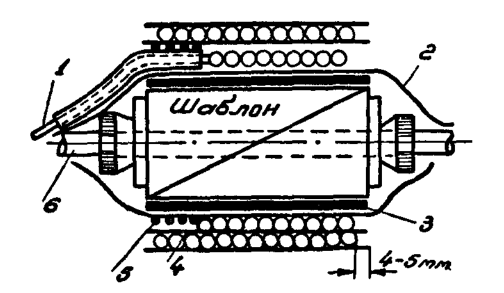
3. Укрепляется нитками у левого или правого края катушки вывод из нее (начало). Выводной конец и ленты закрепляют

на валике для предохранения их от болтания в процессе намотки.

4. Выполняется намотка катушки с прокладкой бумаги через каждый слой. Ширина бумажной прокладки должна быть больше длины намотки на 10 *мм*.

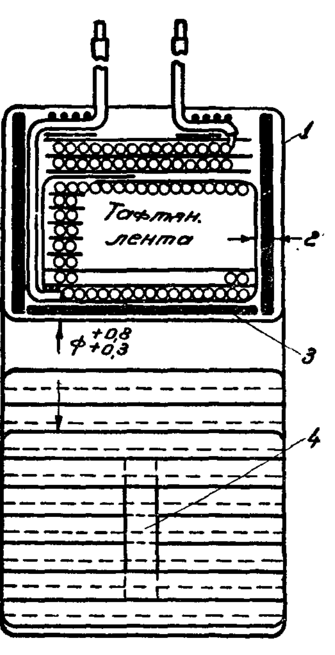
5. За два-три слоя до конца намотки станок останавливают и производят крепление катушки тафтяными лентами, предварительно примяв выступающие концы бумаги (фиг. 2, 10). Процесс крепления осуществляется посредством вспомогательного бандажа, наматываемого на левой половине катушки, с правой же стороны ее продолжают намотку и после того, как ленты закрепляются проволокой, снимают вспомогательный бандаж.

6. Закрепляются нитками на поверхности катушки выводы (фиг. 2, 10).



Фиг. 2, 9. К описанию процесса намотки бескаркасной катушки:

1 — вывод; 2 — лента, 3 — трубка из лакополотна; 4 — бумажная прокладка; 5 — нитка; 6 — валик.



Фиг. 2, 10. Разрез бескаркасной бандажированной катушки:

1 — бандаж из тафтяной ленты, 2 — шайба из микаполотна; 3 — трубка из микаполотна; 4 — табличка.

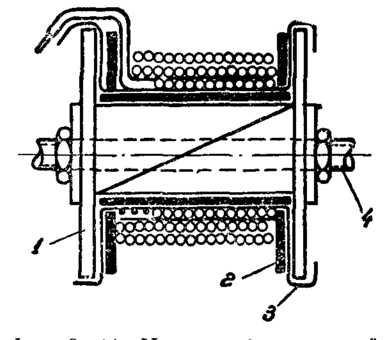
7. Катушка снимается с шаблона и опрессовывается в специальной оправке. При этом уминаются выступающие концы бумаги и катушка доводится до требуемых по чертежу размеров.

На торцах катушки накладываются шайбы из микаполотна и вся катушка бандажируется тафтяной лентой с перекрытием, равным $^1/_3$ ширины ленты. Разрез готовой катушки приведен на фигуре 2, 10.

После окончания вышеуказанных операций осуществляется процесс компаундировки катушки.

Намотка и бандажировка бескаркасной катушки из проволоки с шелковой или хлопчатобумажной изоляцией. Такие катушки исполняются без бумажных прокладок. Для формирования катушки и удержания слоев в процессе намотки шаблон снабжается

боковыми шайбами (фиг. 2, 11). На шаблон наматывается заранее заготовленная полоска микаполотна (фиг. 2, 8) и одеваются боковые шайбы из микаполотна. В остальном процесс намотки совпадает с таким же процессом для катушек из проволоки с эмалевой изоляцией (но без применения бумажных прокладок).

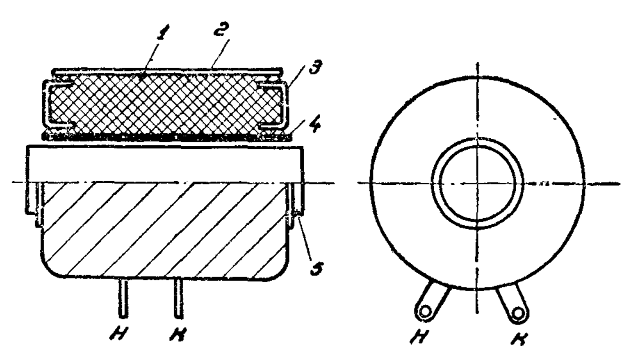


Фиг. 2, 11. Намотка бескаркасной катушки из проволоки с шелковой изоляцией:

1 — шаблон; *2* — шайба, *3* — ленты; *4* — валик станка.

Намотка и бандажировка катушки на сердечнике магнитной системы (фиг. 2, 12). Сердечник покрывается прочно скрепленным с ним тонким слоем изоляции — изолитируется или миканизируется. По краям к сердечнику подклеивают разрезные полотняные шайбы (фиг. 2, 5). По окончании процесса намотки шайбы расправляются по торцу катушки, концы их загибают на наружную поверхность, которая затем бандажируется.

Намотка небандажированной бескаркасной катушки (фиг. 2, 13). В конструкции этой катушки отсутствуют крепящие тафтяные ленты, торцевые шайбы и не применяется бандаж. Намотка катушки производится на металлической оправке. Основой катушки является трубка из бумаги, изготовляемая на этой же оправке



Фиг. 2, 12. Бескаркасная катушка с намоткой на сердечнике:

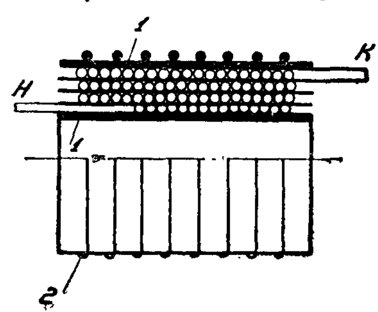
1 — прокладка микаполотна, *2* — бандаж, *3* — шайба полотняная; *4* — гильза; *5* — сердечник.

намоткой нескольких слоев (6—7) бумаги общей толщиной порядка 0,125 *мм*. В некоторых случаях применяют готовые трубки с толщиной стенок, равной 0,5 *мм*. Крепление катушки осуществляется с помощью бумажных прокладок, ширина которых берется такой, чтобы создавалась торцевая изоляция размером с каждой стороны по 2,5—3 *мм*. Сверх последнего ряда катушку обматывают одним слоем бумаги толщиной 0,125 *мм*, который закреп-

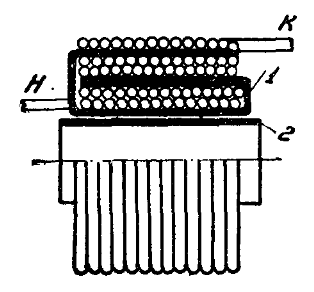
ляется затем тонкой ниткой. Выводы катушки — начало и конец — проходят через торцы катушки.

На автоматических намоточных станках можно осуществить одновременную намотку 8—10 описанных катушек. Длина оправки, трубки и бумажных прокладок соответствует суммарной длине всех катушек. По окончании процесса вся намотка разрезается специальными ножами на отдельные катушки, которые поступают затем в компаундировку.

Намотка бескаркасных токовых катушек. Как правило, для таких катушек применяется медь с хлопчатобумажной изоляцией. Намотка производится на тормозных станках. Основой катушки



Фиг. 2, 13. Бескаркасная небандажированная катушка:
1 — бумага толщиной 0,125 *мм*; 2 — нитка.



Фиг. 2, 14. Бескаркасная токовая катушка из проволоки с хлопчатобумажной изоляцией:
1 — лента; 2 — трубка.

является изоляционная трубка. Для крепления витков катушки и удержания порядка слоев намотка в процессе изготовления затягивается тафтяной лентой (фиг. 2, 14). Свободный конец ленты закрепляется ниткой. По окончании намотки катушка подвергается пропитке.

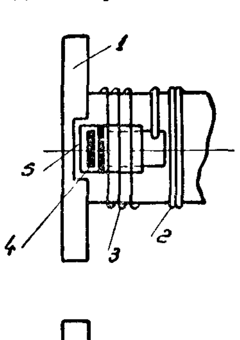
Маркировка катушек. Готовые катушки снабжаются табличкой, в которой указываются данные катушки: рабочее напряжение, число витков, диаметр проволоки, сопротивление при 20°. Табличка выполняется из прессшпана и укрепляется на катушке бандажом (фиг. 2, 10).

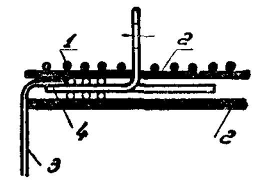
2-7. ВЫВОДЫ КАТУШЕК

В практике применяются различные исполнения выводов катушек.

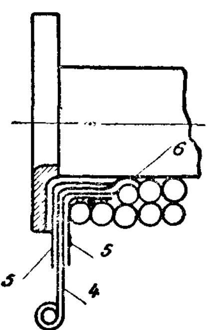
а) В каркасных катушках небольших размеров вывод осуществляется посредством флажков — латунных полосок толщиной 0,5—0,6 *мм*, шириной 4—6 *мм*, которые припаиваются концами к проводу намотки. Монтажный провод в свою очередь припаивается к флажкам. Флажки изолируются от намотки посредством двух полосок лакополотна; крепление флажков к намотке осуществляется тонкими нитками (фиг. 2, 15).

б) В каркасных катушках реле вывод может быть выполнен проводом намотки, присоединяемым к выводным зажимам, расположенным на цоколе. Изоляция выводов от намотки и от цоколя реле осуществляется посредством линоксиновых трубок. В случае, если намотка катушки производится тонкой проволокой, диаметром меньше 0,5 *мм*, необходимо применять специальные выводные провода большего диаметра.

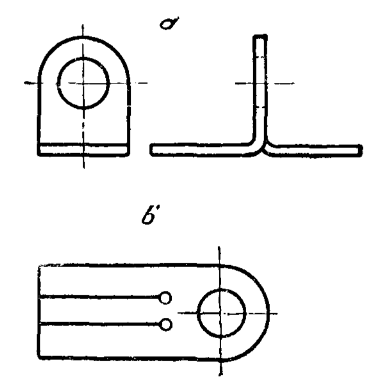




Фиг. 2, 16. Крепление угольника в бескаркасной катушке:
1 — нитки; 2 — лакополотно; 3 — провод; 4 — припаять.



Фиг. 2, 15. Вывод флажком:
1 — каркас; 2 — намотка, 3 — нитки, 4 — флажок, 5 — лакоткань; 6 — припаять



Фиг. 2, 17. Угольник для выводов:
b — заготовка.

В катушках с намоткой из весьма тонкой проволоки (диаметром 0,05—0,1 *мм*) в целях защиты наружных слоев от механических повреждений последние 2—3 слоя намотки производят более толстым проводом (порядка 0,6 *мм*), которым и осуществляется вывод конца катушки.

в) В бескаркасных катушках вывод осуществляется гибким проводом. Для этой цели применяют гибкие кабели, щеточные провода — жгуты с надетыми на них линоксиновыми трубками, или гибкие провода с кембриковой изоляцией. Провода начала и конца припаиваются к проводам намотки и укрепляются в катушке суровыми нитками.

г) В бескаркасных катушках применяется еще исполнение выводов с контактными угольниками. Угольники выштамповываются из латуни, устанавливаются на наружной поверхности

катушки (до ее бандажировки) и укрепляются посредством суровых ниток (фиг. 2, 16). Изоляция угольника (фиг. 2, 17) от намотки осуществляется посредством двух полосок из микаполотна или лакополотна. К контактным угольникам припаиваются провода начала и конца намотки, причем, если намотка производится проволокой диаметром меньше 0,15 *мм*, ставятся промежуточные провода диаметром не меньше 0,25 *мм*. Монтажный провод крепится к угольникам посредством винтов и гаек.

д) Промежуточные выводы катушек осуществляются проволокой намотки, выпускаемой из катушки в виде петли (без разрыва обмотки). Конец петли оголяется и к нему припаивается монтажный провод. Промежуточные выводные провода изолируются в намотке полосками из лакополотна.

2-8. ОТДЕЛКА КАТУШЕК

а) Виды отделки. В практике применяются различные виды отделки катушек, выбор их определяется режимом эксплуатации аппарата, а также и конструкцией катушки.

Каркасные катушки реле, снабженных закрытым пыленепроницаемым кожухом и предназначенных для установки в закрытых сухих помещениях, дополнительной отделке после намотки не подвергаются. Для улучшения внешнего вида таких катушек наружная поверхность их намотки обвертывается тонким слоем лакополотна, с небольшим нахлестом для склейки концов полотна. Дополнительная отделка обязательна для катушек реле, не имеющих кожуха, и для всех бескаркасных катушек.

Различают следующие виды отделки катушек:

Пропитка катушек пропиточными электроизоляционными лаками. При пропитке катушек улучшаются качества пористой и, в частности, волокнистой твердой изоляции элементов катушки: бумаги, картона, пряжи — шелковой, хлопчатобумажной и др. После пропитки поры в изоляции оказываются заполненными уже не воздухом, а высохшим лаком, благодаря чему увеличиваются пробивное напряжение и теплопроводность, уменьшается гигроскопичность и улучшаются механические свойства изоляции.

Пропитка катушек обычно осуществляется при определенном давлении, порядка 7 *ат*. Катушки с проволокой диаметром 0,9 *мм* и выше можно пропитывать и не под давлением.

Компаундировка катушек производится пропиточными компаундами при температуре 150—160° и при давлении порядка 7 *ат*. Жидкий компаунд при повышенной температуре и высоком давлении проникает в поры и капилляры изоляции обмоток, заполняет промежутки между проволоками, вследствие чего катушка получается в виде монолитной массы без пор. Создается надежное механически прочное сцепление между отдельными витками, что особенно важно для катушек переменного тока, а также для катушек постоянного тока, работающих при повторно-кратковременном

режиме с большой частотой включения. В этих случаях при отсутствии достаточного механического сцепления между отдельными витками могут появляться короткозамкнутые витки в результате истирания междувитковой изоляции, вызванного взаимным перемещением проволок при включении и отключении катушек.

Компаундированные катушки обладают высокой влагостойкостью и стойкостью против действия воды, паров, кислот и щелочей. Вследствие заполнения компаундом пор и капилляров повышается теплопроводность изоляции по толщине катушек.

Процесс компаундировки катушек является более рациональным, чем процесс пропитки, что определяется следующим:

1. Пропиточные лаки содержат большое количество летучих (порядка 50—60%), вследствие чего при просушке катушки в ней образуются поры. Пропиточные компаунды обладают весьма незначительной усадкой, содержат в себе незначительное количество летучих, поэтому компаундированная катушка получается монолитной.

2. Кислотность компаундов чрезвычайно низка, что исключает возможность разрушения хлопчатобумажной изоляции и окисления меди обмотки.

Пропитка катушек в горячих смолах, но без давления. Такой процесс применим только для бескаркасных катушек, не имеющих торцевого бандажа (фиг. 2, 13).

Покрытие лаками. Покровные лаки служат для образования на поверхности катушки механически прочной пленки, повышающей влагостойкость изоляции, стойкость против действия химически активных реагентов, уменьшающей возможность приставания к катушке пыли и грязи, улучшающей внешний вид катушки.

Особое значение имеет применение пигментированных покровных лаков (пигментированные эмали), содержащих в своем составе измельченный в тонкий порошок неорганический наполнитель — пигмент, придающий лаковой пленке определенную окраску и увеличивающий ее механическую прочность.

Покрытие лаками рекомендуется применять в следующих случаях:

1) для токовых катушек из проволоки с хлопчатобумажной изоляцией;

2) для катушек, предварительно подвергнутых пропитке в асфальтовых или асфальтомасляных лаках;

3) для компаундированных катушек, работающих в особо тяжелых режимах в отношении влияния внешней среды. Эти катушки покрывают пигментированными лаками.

б) Процессы отделки. Ниже приводится описание нескольких примерных процессов отделки катушек.

Пропитка токовых катушек из проволоки с хлопчатобумажной изоляцией производится черными асфальтомасляными лаками. Перед пропиткой катушки подвергаются сушке при температуре

105—110° в течение 3 часов, затем им дают охладиться до 60—70° и еще теплыми погружают на 4 часа в сосуд с лаком. После этого катушки раскладываются на 30 минут на сетке для стекания лака и затем снова подвергаются сушке при температуре 110—120° в течение 10 часов.

Пропитка катушек из проволоки с эмалевой изоляцией осуществляется под давлением в автоклаве черными асфальтомасляными лаками, не содержащими в себе в качестве растворителя бензола, разрушающе действующего на эмалевую изоляцию. Перед пропиткой катушки прогреваются в печи при температуре 65—80° в течение 3 часов и затем погружаются в автоклав. В автоклаве создается давление до 7 *ат*, которое выдерживается в течение 5 минут, затем давление снимается на 5 минут и снова повышается до 7 *ат*. Выдержка под давлением и без давления (или под вакуумом) повторяется три раза, после чего катушки выгружаются из автоклава, раскладываются на 30 минут на сетках для стекания лака и затем подвергаются окончательной сушке при температуре 120° в течение 36 часов. После пропитки катушки покрываются лаком.

Компаундировка катушек с проволокой из эмалевой изоляции. Каркасные катушки можно компаундировать только при снятых торцевых шайбах и без наружного бандажа. Катушки с бескаркасной намоткой могут подвергаться компаундировке в законченном виде. Пропиточный компаунд представляет собой битуминозную массу, получаемую из нефти. Температура размягчения компаунда 105—113°, при температуре 150° масса становится жидкой и однородной.

Весь процесс заключает в себе следующие основные стадии.

1. Дополнительная бандажировка катушек хлопчатобумажной лентой (киперной).

2. Сушка в компаундировочном котле (без компаунда) в течение 3—4 часов, при температуре 110—120° при нормальном давлении, а затем в течение 30 минут при вакууме.

3. Тренировочный режим, заключающийся в том, что катушки подвергаются в котле с компаундом попеременно давлению в 7 *ат* в течение 5 минут, а затем вакууму (740—750 *мм*) в течение такого же времени, причем этот процесс повторяется пять раз.

4. После тренировочного режима катушки выгружаются из котла, и с них снимается временный бандаж с налипами компаунда.

На наших заводах разработан процесс компаундирования бандажированных катушек, при котором избегается необходимость накладки дополнительного временного бандажа, применяемого для устранения налипов компаунда и остатков примесей битума на поверхности готовой катушки.

В новом процессе битум загружается в варочный котел переплавленным, применена специальная конструкция каркаса для загрузки катушек. Этот каркас исполнен так, чтобы в процессе

передавливания битума из компаундировочного котла в варочный битум стекал с верхних слоев катушек, не попадая на нижние.

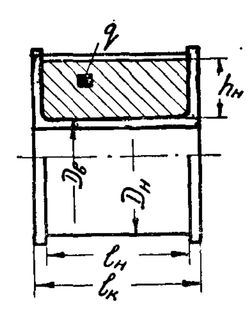
Покрытие покровными лаками для компаундированных катушек производится только при работе катушек в особых условиях.

Пропитка без давления в горячих смолах производится при температуре 160°. Такой пропитке можно подвергать бескаркасные небандажированные катушки из проволоки с эмалевой изоляцией.

Покраска катушек производится или пульверизатором, или процессом окунания. Как правило, применяют покровные лаки воздушной сушки, например, черные асфальтомасляные лаки, имеющие длительность сушки на воздухе около трех часов. Пигментированные лаки требуют печной сушки.

2-9. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ

а) Общие определения. Коэффициентом заполнения катушки ($f_к$) называют отношение сечения меди катушки ко всему сечению катушки. Так, если катушка (фиг. 2, 18) длиной $l_к$, наружным диаметром $D_н$, внутренним $D_в$ имеет w витков с диаметром проволоки, равным d, то сечение меди катушки будет



Фиг. 2, 18. Сечение катушки.

$$q_м = \frac{\pi d^2}{4} w.$$

Сечение всей катушки

$$q_к = l_к \frac{(D_н - D_в)}{2}.$$

Коэффициент заполнения

$$f_к = \frac{q_м}{q_к} = \frac{\pi d^2}{2} \frac{w}{l_к (D_н - D_в)}. \qquad (2—1)$$

При конструировании катушки стремятся к получению максимального значения $f_к$, которое зависит от следующих факторов: 1) изоляции катушки, 2) изоляции намотки, 3) формы сечения проволоки, 4) процесса намотки, 5) размеров проволоки.

Изоляция катушки. В каркасной катушке определенный объем ее занят изоляционными материалами каркаса, наружным бандажом; в бескаркасной — изоляцией катушки от магнитопровода, торцевой изоляцией, наружным бандажом.

Изоляция намотки. Определенный объем катушки занят изоляцией обмоточного провода — эмалевой, шелковой, хлопчатобумажной или другими. Кроме того, в ряде случаев между слоями проволоки прокладывают изоляционную бумагу, также занимающую определенный объем.

Форма проволоки. При намотке квадратной проволоки получается больший коэффициент заполнения, чем при намотке круг-

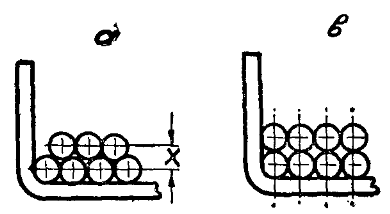
лой. В практике, однако, как правило, применяют круглую проволоку и только при сечениях проволоки, превышающих 10 *мм*², ставят квадратную.

Процесс намотки. В процессе намотки в зависимости от совершенства намоточного станка или квалификации рабочего получается большая или меньшая плотность укладки проводов, что сильно сказывается на величине коэффициента заполнения. В зависимости от процесса намотки получаются следующие виды намотки:

1) рядовая, когда витки в одном ряду расположены плотно друг к другу, а витки вышележащего ряда лежат точно над витками нижнего (фиг. 2, 19 *b*);

2) шахматная, когда витки вышележащего ряда расположены в промежутках между витками нижнего (фиг. 2, 19 *a*);

3) дикая, когда витки расположены рядами, но без точной укладки их.



Фиг. 2, 19. Виды намоток: *a* — шахматная; *b* — рядовая.

Размеры проволоки. При малых сечениях проволоки величина ее изоляции относительно больше. Поэтому величина коэффициента заполнения катушки тем меньше, чем меньше диаметр проволоки. Следует также учитывать и то обстоятельство, что при намотке катушек из тонкой проволоки нередки случаи обрыва ее. В связи с этим требуется спайка концов и изолировка их, что, в свою очередь, занимает дополнительно некоторое пространство в намотке. Поэтому в релестроении избегают применения проволоки диаметром меньше 0,1 *мм*. Но при исполнении катушек поляризованных и магнитоэлектрических реле приходится применять тонкую проволоку диаметром до 0,02 *мм*.

б) Коэффициент укладки. Наилучшие результаты в отношении достижения высокого значения величины коэффициента заполнения получаются при шахматной намотке. В этом случае расстояние между серединами двух соседних слоев (фиг. 2, 19 *a*) равно

$$x = \sqrt{d_1^2 - \frac{d_1^2}{4}} = 0{,}86\,d_1, \qquad (2\text{-}2)$$

где d_1 — диаметр проволоки с изоляцией.

Число витков катушки, таким образом, при шахматной намотке получается

$$w_1 = \frac{h_н l_н}{0{,}86 d_1^2}, \qquad (2\text{-}3)$$

в то время, как число витков при рядовой намотке составляет

$$w_2 = \frac{h_н l_н}{d_1^2}. \qquad (2\text{-}4)$$

Отсюда

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{1}{0,86} = 1,16. \qquad (2\text{-}5)$$

Таким образом, коэффициент заполнения при шахматной намотке должен быть на 16% выше, чем при рядовой. Однако в практике редко рассчитывают на выполнение шахматной намотки.

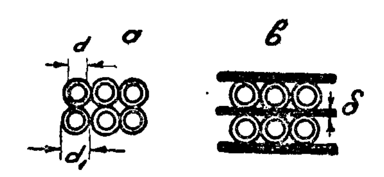
При рядовой намотке неизбежно попадание некоторых витков верхнего ряда в промежутки между витками нижнего, что увеличивает число витков катушки на 5—6%, но это увеличение аннулируется получающимися в процессе производства неизбежными неплотностями между витками одного ряда. Поэтому в практических расчетах учитывается рядовая намотка, причем полученное число витков умножают на коэффициент укладки k_y, значение которого колеблется в следующих пределах:

$k_y = 0,8 - 0,9$ для дикой намотки;

$k_y = 0,9 - 0,95$ для рядовой, выполненной на автоматах и полуавтоматах.

Меньшее значение k_y принимается для тонких проволок.

в) Коэффициент заполнения намотки — $f_н$. При определении его учитывают только пространство, занимаемое непосредственно обмоткой — площадка $h_н l_н$ (фиг. 2,18). Следует принимать также во внимание значение коэффициента укладки k_y.



Фиг. 2, 20. Сечение намотки: *а* — без прокладки; *b*—с прокладкой.

Значение $f_н$ определяется из следующих соотношений: для намотки без прокладок (фиг. 2, 20, *а*)

$$f_н = k_y \frac{\pi d^2}{4d_1^2}; \qquad (2\text{-}6)$$

для намотки с прокладкой через слой (фиг. 2, 20, *b*)

$$f_н = k_y \frac{\pi d^2}{4d_1(d_1 + \delta)}, \qquad (2\text{-}7)$$

где d — диаметр голой, а d_1 — диаметр изолированной проволоки; δ — толщина бумажной прокладки.

г) Коэффициент заполнения катушки. С учетом коэффициента заполнения намотки и коэффициента укладки коэффициент заполнения катушки (фиг. 2, 18) определится следующим образом:

$$f_к = f_н \frac{h_н l_н}{h_к l_к}, \qquad (2\text{-}8)$$

и число витков катушки будет

$$w = f_к \frac{4 h_к l_к}{\pi d^2}. \qquad (2\text{-}9)$$

д) Практические данные. Обычно каждая магнитная система выполняется для разных пределов токов и напряжений рабочей

катушки. Так, например, реле с катушкой напряжения постоянного тока выпускаются для работы при напряжениях 24, 48, 110, 220 *в*.

При предварительных расчетах реле принимают во внимание какой-то средний коэффициент заполнения, а затем при окончательном расчете катушки для данного напряжения значение этого коэффициента уточняется.

Ввиду некоторой неопределенности значения коэффициента укладки k_y, зависящего от совершенства процесса намотки, для определения значений $f_н$ и $f_к$ в практике пользуются опытными данными. В таблицах 5 и 6 приведены опытные данные заводов «Красная заря» и ХЭМЗ.

Таблица 5

Опытные данные завода «Красная заря» для определения $f_н$ проволоки с эмалевой изоляцией

(намотка без прокладок)

Диаметр голой проволоки, *мм*	Коэффициент $f_н$	Диаметр голой проволоки, *мм*	Коэффициент $f_н$
0,05	0,25	0,18	0,66
0,10	0,48	0,20	0,685
0,11	0,49	0,23	0,73
0,12	0,51	0,25	0,76
0,14	0,56	0,27	0,786
0,15	0,58		

Таблица 6

Опытные данные ХЭМЗа для определения коэффициента заполнения катушки $f_к$ для проволоки с эмалевой изоляцией

(катушка каркасная)

Диаметр голой проволоки, *мм*	Намотка с ручной подачей				Намотка с автоматической подачей	
	Гильза цилиндрическая	Гильза прямоугольная	Гильза прямоугольная, прокладки через 1 слой	Гильза прямоугольная, прокладки через 2 слоя	Гильза цилиндрическая, прокладка через 1 слой	Гильза прямоугольная, прокладка через 1 слой
0,05	—	—	—	0,3	—	—
0,10	0,440	0,420	0,285	0,35	0,38	0,36
0,15	0,495	0,475	—	0,39	—	—
0,20	0,535	0,515	0,350	0,425	0,48	0,44
0,25	—	—	—	0,460	—	—
0,30	—	—	0,385	—	0,54	0,37
0,40	—	—	0,410	—	0,57	0,53

2-10. НАГРЕВ КАТУШЕК ПОСТОЯННОГО ТОКА

Нагрев катушки определяется потерей мощности при протекании тока I: $P = I^2r$.

Предельная допустимая температура нагрева катушки ограничивается теплостойкостью изоляции. Последняя характеризуется той максимальной температурой, выше которой начинается разрушение материала или резкое ухудшение его свойств, как-то: резкое понижение электрической или механической прочности или прогрессивное старение материала. В катушках реле применяется изоляция классов *О* и *А*.

К классу О относятся органические изоляционные материалы: хлопок, шелк, бумага. К этому же классу относятся катушки с обмоткой из проволоки с эмалевой изоляцией, снабженные прокладками из непропитанной бумаги.

К классу А относятся органические материалы: хлопок, шерсть или бумага, пропитанные или погруженные в масло, а также эмалевая изоляция. По существующим нормам допускаются следующие предельные температуры: класс *О* — 90°, класс *А* — 105°.

Эти данные относятся к органическим изоляционным материалам, выдерживающим без доступа воздуха и влаги срок службы от 7 до 15 лет (в среднем считают 10 лет). При превышении указанных температур на 10—12° срок службы уменьшается вдвое.

В ряде аппаратов для катушек из проволоки с изоляцией класса *А* предельную температуру нагрева принимают равной 120°. Такая повышенная температура допускается для случаев, когда катушка подвергается компаундировке, при которой изоляция катушки и намотки пропитывается смолой, все промежутки между изоляцией также заполняются смолой и катушка становится монолитной. При таких условиях, если изоляция при повышенной температуре нагрева и становится хрупкой, катушка не выходит из строя, так как изоляция не разрушается механически. При применении в катушке изоляции из стеклянной пряжи и пропитке катушки специальными компаундами, например кремнеорганическими смолами, предельная допустимая температура нагрева повышается до 175° и выше.

При протекании тока I в течение достаточно большого промежутка времени в катушке устанавливается определенная температура, причем температура внутри катушки несколько выше, чем на ее поверхности. На фигуре 2, 21 приведена примерная кривая распределения температуры по сечению катушки. Максимальная температура получается приблизительно на расстоянии $^1/_3$ от начала катушки.

Существует несколько методов измерения температуры нагрева катушки. Наиболее точные данные получаются при определении температуры нагрева с помощью температурных детекторов (термопар), заложенных внутри катушки в разных местах

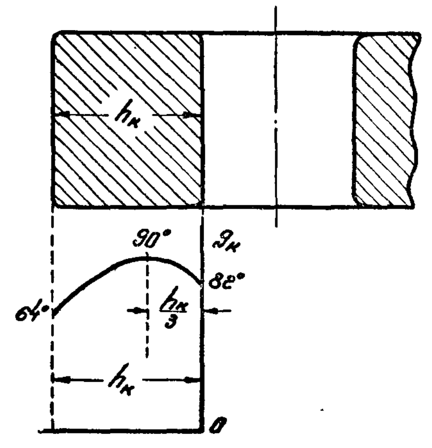
ее намотки. Этот метод применим только в лабораторных условиях. Из практических методов известны метод сопротивления и метод термометра.

Метод сопротивления основан на изменении удельного сопротивления меди с увеличением ее температуры. Это изменение происходит по линейному закону. Определяют сопротивление r_1 катушки в холодном состоянии при температуре окружающей среды ϑ_1 и r_2 — в горячем состоянии:

$$r_1 = r_0\ (1 + \alpha\vartheta_1);$$
$$r_2 = r_0\ (1 + \alpha\vartheta_2).$$

Здесь r_0 — сопротивление при температуре 20°.

По отношению сопротивлений r_1 и r_2 можно определить температуру ϑ_2 нагрева катушки. При методе сопротивления получаются данные, относящиеся к средней температуре нагрева, несколько меньшей максимальной.



Фиг. 2, 21. Распределение температуры по сечению намотки.

По методу термометра измеряют температуру на наружной поверхности катушки. Результаты измерения также получаются заниженными по сравнению с максимальной температурой внутри катушки. На основании опытных данных установлена разница между измеренной и максимальной температурой катушки (см. табл. 7).

Таблица 7

Допустимые значения нагрева и превышения температуры в °C (при $\vartheta_0 = 35°$) катушек реле

Метод измерения	Класс 0		Класс А		А компаундированная	
	нагрев	превышение температуры	нагрев	превышение температуры	нагрев	превышение температуры
	$\vartheta_к$	θ	$\vartheta_к$	θ	$\vartheta_к$	θ
Термометром или термопарой . .	90	45	105	60	120	65
Сопротивления . .	90	55	105	70	120	85

При расчете катушки необходимо принимать во внимание еще значение температуры окружающей среды, учитывая наихудшие

условия. По нормам такая температура ϑ_0 принята равной 35°. Для работы аппаратов в специальных условиях, например на морских судах, в производствах с повышенной температурой окружающей среды, принимают $\vartheta_0 = 40°$.

В таблице 7 приводятся данные допустимых значений нагрева катушки ($\vartheta_к$) и превышения температуры θ с учетом $\vartheta_0 = 35°$ для классов изоляции *О* и *А*.

При расчете катушек пользуются данными допустимых значений превышения температуры по методу сопротивления.

2-11. ТЕПЛООТДАЧА КАТУШЕК ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Общее уравнение. При установившемся нагреве все тепло, выделяемое током в катушке, переходит в окружающую среду. Переход тепла осуществляется различными путями: лучеиспусканием, конвекцией и теплопроводностью от внутренней поверхности катушки к стали магнитопровода. Законы передачи тепла для каждого из указанных видов различны. Величина теплоотдачи катушки определяется различными факторами.

Теплопередача с внутренней поверхности катушки. В системах постоянного тока магнитопровод не нагревается вихревыми токами и потерями на гистерезис. Поэтому в таких системах стремятся к уменьшению толщины изоляции между медью намотки и сталью, благодаря чему увеличивается коэффициент теплопроводности от внутренней поверхности катушки.

Наименее благоприятные условия получаются в этом отношении у каркасных катушек, в которых имеется относительно большой зазор с малой теплопроводностью, определяемый толщиной каркаса и наличием небольшого воздушного зазора между каркасом и сталью. Согласно опытным данным ХЭМЗа, наличие воздушного зазора в 0,25 *мм* на сторону уменьшает теплопередачу катушки на 8%, а зазор в 0,5 *мм* — на 11%.

Лучшие условия теплопередачи получаются в бескаркасных катушках, у которых толщина изоляции меньше, чем в каркасных. Еще более благоприятные условия теплопередачи имеют место в бескаркасных катушках, намотанных непосредственно на сердечнике магнитной системы. В таких катушках теплопередача повышается на 10% по сравнению с каркасной.

В системах переменного тока, где сердечник нагревается от вихревых токов и от потерь, определяемых гистерезисом, катушка, как правило, исполняется каркасной, чтобы устранить передачу тепла от сердечника к катушке. В индукционных реле часто применяют бескаркасные катушки, так как индукция в магнитных системах таких реле невелика и магнитопровод нагревается незначительно.

Влияние отделки на теплоотдачу. При пропитке катушек теплоотдача последних повышается на 3—4%, при компаундировке на 8—10%.

Влияние расположения катушки. На теплоотдачу катушки влияет еще ряд условий, определяемых расположением катушки в магнитной системе, наличием кожуха и другими причинами.

Точное определение количества тепла, отдаваемого катушкой, связано с весьма громоздкими расчетами. Поэтому в практических расчетах пользуются упрощенной формулой, которой учитывается только явление конвекции. Такое упрощение принято по следующим соображениям.

1. При относительно небольших температурах нагрева, допустимых для катушки (100—120°), количество тепла, отводимого лучеиспусканием, невелико, и этот процесс рассматривается совместно с конвекцией.

2. Точный учет количества тепла, отдаваемого теплопроводностью от внутренней поверхности катушки к магнитопроводу, весьма затруднителен, и этот процесс также рассматривается совместно с явлением конвекции, для чего в соответствующих соотношениях вводится величина внутренней поверхности катушки.

Таким образом, теплоотдачу лучеиспусканием, теплопроводностью и конвекцией объединяют и с достаточной точностью производят подсчет по уравнению

$$I^2r = \mu S\theta, \qquad (2\text{-}10)$$

где μ — коэффициент теплоотдачи, выраженный в ваттах на $см^2$ на градус;

S — поверхность охлаждения катушки (наружная и внутренняя) в $см^2$;

θ — превышение температуры катушки, представляющее собой разность между средней температурой намотки и температурой окружающей среды.

б) Поверхность охлаждения катушки. При определении поверхности охлаждения катушки учитывают, как правило, только внутреннюю и наружную ее поверхности. Теплоотдача с торцов катушки незначительна вследствие наличия у торцов относительно толстого слоя изоляции между медью намотки и окружающим воздухом. Кроме того, катушки располагаются обычно в магнитных системах так, что торцевые поверхности не участвуют в отдаче тепла конвекцией.

При исполнении катушек с металлическим каркасом следует учитывать теплоотдачу от меди намотки к металлу каркаса и с торцов катушки.

Имеются, однако, магнитные системы с развитыми по диаметру катушками. В этих случаях учитывают теплоотдачу торцевых поверхностей катушки.

Для круглых катушек

$$S = \pi (D_н + D_в)\ l_к\ 10^{-2}\ (см^2). \qquad (2\text{-}11)$$

Так как средняя длина витка $l_{cp} = \frac{\pi(D_н + D_в)}{2}$ *мм*, можно написать

$$S = 2\ l_{cp}\ l_к\ 10^{-2}\ (см^2) \tag{2-12}$$

(l_{cp}, $l_к$, $D_н$ и $D_в$ принимаются в *мм*).

Это же соотношение (2—12) остается в силе и для прямоугольных катушек. При наличии металлических каркасов

$$S_к = S_н + S_в + S_т, \tag{2-13}$$

где $S_н$, $S_в$, $S_т$ — соответственно поверхности катушки — наружная, внутренняя и торцевая.

в) Превышение температуры. Значение θ определяется как разность

$$\vartheta_к - \vartheta_0 = \theta. \tag{2-14}$$

Величины допустимых превышений температуры приведены в таблице 7. При расчете катушки стремятся к получению значений θ, несколько меньших (на 5—10°), чем допустимые, что делается с учетом различных, возможных в производстве, отклонений в изготовлении катушки.

г) Коэффициент теплоотдачи, μ. Значение μ определяется на основании опытных данных. Так, установлено, что для матовой черной поверхности $\mu = 12 \cdot 10^{-4} \div 14 \cdot 10^{-4}$ (*вт/см*² °С).

При расчете катушек принимают несколько иные значения, в которых учитывается некоторая величина теплоотдачи от внутренней поверхности катушки. Значение μ находится в зависимости от превышения температуры, степени изоляции внутренней поверхности катушки от стали и от отделки катушки. Практически в отношении степени изоляции намотки от стали различают два исполнения:

1. Магнитные системы с хорошей теплопроводностью от меди катушки к стали. Сюда могут быть отнесены бескаркасные небандажированные катушки, бескаркасные с намоткой на сердечнике.

2. Магнитные системы с плохой теплопроводностью от меди к стали. Сюда могут быть отнесены каркасные, бескаркасные бандажированные, свободные катушки (без стали).

При компаундировке катушек получаются лучшие условия теплопроводности от более нагретых слоев намотки к менее нагретым, поэтому значение μ повышается на 7÷8%. В таблице 8 даны $\mu = f(\theta)$, полученные на основании ряда экспериментов с различными видами катушек.

В таблице 8 принято значение θ при температуре окружающей среды 35° ($\theta = \vartheta_к - 35$). Шкала *А* относится к катушкам с хорошей теплопроводностью от намотки к стали, шкала *В* — с плохой.

Пример. Определить допустимые потери (в *вт*) каркасной катушки из проволоки с эмалевой изоляцией.

Размеры катушки: $l_к = 120$ *мм*, $D_н = 60$ *мм*, $D_в = 20$ *мм*.

Поверхность охлаждения 302 *см*².

Принимаем: $\theta = 70°$, по шкале *B*:

$$\mu = 10{,}99 \cdot 10^{-4},\quad P = I^2r = 10{,}99 \cdot 10^{-4} \cdot 302 \cdot 70 = 23{,}1\ вт$$

Таблица 8

Значения $\mu = f(\theta)$

$\theta°$	Шкала *A*, *вт/см*² °С	Шкала *B*, *вт/см*² °С
40	$11{,}00 \cdot 10^{-4}$	$9{,}84 \cdot 10^{-4}$
45	$11{,}20 \cdot 10^{-4}$	$10{,}01 \cdot 10^{-4}$
50	$11{,}41 \cdot 10^{-4}$	$10{,}19 \cdot 10^{-4}$
55	$11{,}62 \cdot 10^{-4}$	$10{,}37 \cdot 10^{-4}$
60	$11{,}80 \cdot 10^{-4}$	$10{,}54 \cdot 10^{-4}$
65	$12{,}04 \cdot 10^{-4}$	$10{,}72 \cdot 10^{-4}$
70	$12{,}25 \cdot 10^{-4}$	$10{,}99 \cdot 10^{-4}$
75	$12{,}46 \cdot 10^{-4}$	$11{,}17 \cdot 10^{-4}$
80	$12{,}68 \cdot 10^{-4}$	$11{,}35 \cdot 10^{-4}$
85	$12{,}89 \cdot 10^{-4}$	$11{,}52 \cdot 10^{-4}$

д) Определение требуемой поверхности охлаждения катушки. Для быстрого расчета и проверки данных катушки на практике применяют несколько упрощенный метод, пользуясь опытными данными, в которых указывается потребное число квадратных сантиметров **наружной** поверхности катушки при условии, что превышение температуры ее не превосходит нормы.

В таблице 9 приведены опытные данные для каркасных катушек.

Таблица 9

Потребное число квадратных сантиметров наружной поверхности охлаждения каркасных катушек на 1 *вт* потерь

Отношение длины катушки к ее толщине	Изоляция проволоки		
	хлопчатобумажная, *см*²/*вт*	хлопчатобумажная с пропиткой, *см*²/*вт*	эмалевая *см*²/*вт*
$l_к/h_к \geq 2$	14	12	10
$l_к/h_к \geq 1$	13	11	9
$l_к/h_к < 1$	12	10	

Пример. Определить допустимые потери (в *вт*) каркасной катушки из проволоки с эмалевой изоляцией с размерами, указанными в предыдущем примере:

$$l_к/h_к = \frac{12}{2} = 6;\ S_н = \pi \cdot 6 \cdot 12 = 226\ см^2.$$

Считая, что на 1 *вт* потерь требуется 10 $см^2$ наружной поверхности охлаждения, определяем, что для даной катушки допустимые полные потери равны

$$I^2r = \frac{226}{10} = 22{,}6\ вт.$$

Результаты приближенного подсчета близки к данным предыдущего примера.

е) Влияние способа намотки на теплоотдачу катушки. М. Г. Кобленц провел исследования нагрева катушек контакторов постоянного тока при разных способах намотки катушки:

1) бескаркасной бандажированной;

2) бескаркасной, намотанной на стальной трубе (труба надевается на сердечник магнитопровода);

3) бескаркасной, намотанной непосредственно на сердечнике.

В результате проделанной работы установлены разные значения превышения температуры для указанных трех видов катушек. На основании результатов испытаний М. Г. Кобленц предлагает следующую формулу определения превышения температуры катушек:

$$P = \mu (S_н + \alpha S_в)\, \theta, \qquad (2\text{-}15)$$

где $S_н$ — наружная поверхность охлаждения;
$S_в$ — внутренняя поверхность охлаждения;
α — коэффициент.

По данным исследования получены следующие результаты:
при превышении температуры $\theta = 80°$
для бескаркасной бандажированной $\alpha = 0{,}9$;
для катушки, намотанной на трубе, $\alpha = 1{,}7$;
для катушки, намотанной на сердечнике, $\alpha = 2{,}4$.

Результаты исследования совпадают с данными таблицы 8 для случая бескаркасной бандажированной катушки. Так, по этой таблице по шкале *А* имеем при $\theta = 80°$ и учете $S = S_н + S_в$ значение $\mu = 12{,}66 \cdot 10^{-4}$.

2-12. НАГРЕВ И ТЕПЛООТДАЧА КАТУШЕК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Приведенные выше данные для определения превышения температуры катушек получены на основании анализа экспериментальных материалов исследования магнитных систем постоянного тока. При определении превышения температуры катушек переменного тока решение задачи несколько усложняется, так как в магнитной системе переменного тока сталь магнитопровода дополнительно подогревается потерями от вихревых токов и гистерезиса. Превышение температуры стали магнитопровода несколько ниже

превышения температуры намотки, поэтому для упрощения задачи считают, что магнитопровод не подогревает катушку, а с внутренней поверхности катушки нет отдачи тепла магнитопроводу.

Для расчета катушек переменного тока практически пользуются основным уравнением нагрева (2—10): $P = \mu S\theta$.

Принимают P как сумму всех потерь в магнитной системе: в омическом сопротивлении, на гистерезис и вихревые токи, а также в короткозамкнутых витках (экранах), если эти витки расположены непосредственно у катушки: $P_к = P_r + P_г + P_в + P_э$. Коэффициент теплоотдачи μ определяют по шкале B таблицы 8 (для катушек с плохой теплоотдачей от внутренней поверхности).

2-13. СОПРОТИВЛЕНИЕ НАМОТКИ

Общее выражение сопротивления

$$r = \rho \frac{l_{ср}}{q} w \cdot 10^{-3} \text{ ом}, \qquad (2\text{-}16)$$

где $l_{ср}$ — средняя длина витка в *мм*;

q — сечение голой проволоки в *мм*^{2}.

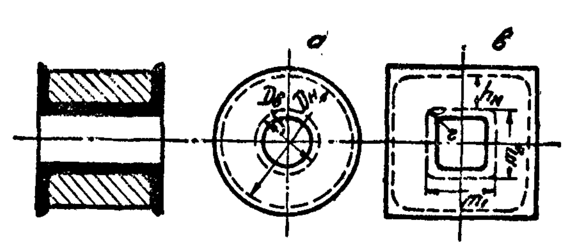
Для круглой катушки (фиг. 2, 22 *а*)

$$l_{ср} = \frac{\pi (D_н + D_в)}{2}, \qquad (2\text{-}17)$$

где $D_н$ и $D_в$ приняты в *мм*.

Для прямоугольной катушки (фиг. 2, 22 *b*)

$$l_{ср} = 2(m_1 + m_2) + \pi(2r + h_н). \qquad (2\text{-}18)$$



Фиг. 2, 22. Размеры намотки.

При расчете катушки следует принимать во внимание значение ρ при повышенной температуре. Так, если катушка исполняется с изоляцией класса A, следует учитывать ρ_{105}.

Температурный коэффициент меди в пределах нагрева от 10 до 100° принимается равным 0,0393. Для проводниковой меди пользуются значениями ρ, приведенными в таблице 10.

Таблица 10

Значения ρ

Рабочая температура, °С	Сопротивление (удельное) *ом. мм²/м*	Рабочая температура, °С	Сопротивление (удельное) *ом. мм²/м*
20	$\rho_{20} = 0{,}01754$	90	$\rho_{90} = 0{,}02236$
35	$\rho_{35} = 0{,}01857$	105	$\rho_{105} = 0{,}02339$
40	$\rho_{40} = 0{,}01991$	120	$\rho_{120} = 0{,}02443$

Измеренное действительное сопротивление катушки не всегда совпадает с расчетным. Определяется это получающимися в производстве отклонениями в размерах проволоки (табл. 11), а также в числе витков.

Таблица 11

Допускаемые по ГОСТ отклонения в размерах проволоки

Диаметр голой меди, *мм*	От 0,05 до 0,08	От 0,09 до 0,25	От 0,25 до 0,69	От 0,74 до 1	От 1,15 до 1,56
Допускаемые отклонения, *мм*	± 0,003	± 0,005	± 0,01	± 0,015	± 0,02

Действительное сопротивление катушки получается равным

$$r_д = 4\rho \frac{l_{cp}\,(w \pm \Delta w)}{\pi\,(d \pm \Delta d)^2} 10^{-3}\ ом, \qquad (2\text{-}19)$$

где Δw — величина отклонения в числе витков.

При определении большей величины сопротивления учитывают $+\Delta w$ и $-\Delta d$, при определении меньшей величины: $-\Delta w$ и $+\Delta d$.

Сопротивление в функции числа витков и габаритов. Подставляя в (2—16) значение q, определяемое из (2—9), получают выражение для сопротивления в функции числа витков и геометрических размеров намотки:

$$r = \rho \frac{l_{cp}\,w^2}{f_к\,l_к\,h_к} 10^{-3} = k_r w^2, \qquad (2\text{-}20)$$

здесь $k_r = \rho \frac{l_{cp}}{f_к\,l_к\,h_к} 10^{-3}$ — постоянный коэффициент, зависящий от материала проволоки и геометрических размеров намотки.

Выражение (2—20) применяется в том случае, когда необходимо определить сопротивление катушки при изменении числа витков. Следует учитывать и изменение коэффициента заполнения.

2-14. РАСЧЕТ КАТУШКИ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

При расчете катушки учитывается режим работы аппарата. Различают следующие режимы работы:

ПРР — продолжительный (длительный) режим работы, когда катушка включена на длительный промежуток времени.

КРР — кратковременный режим работы, когда катушка включена на небольшой период, порядка нескольких секунд, и время паузы достаточно велико, чтобы катушка охладилась в течение этой паузы до температуры окружающей среды.

ПКРР — повторно-кратковременный (прерывистый) режим работы, при котором рабочий период $t_в$ (период включения) регулярно (или нерегулярно) чередуется с периодами отключения. Общая продолжительность цикла $t_ц = t_в + t_п$ обычно не превышает 10 минут.

РКЗ — режим короткого замыкания. Этот режим рассматривается только при расчете токовых катушек.

При нормальном режиме установки, где включен аппарат, в катушке протекает номинальный ток $I_н$. При аварийном режиме в катушке протекает ток короткого замыкания, который во много раз (50 ÷ 100) больше номинального. В таких случаях расчет катушки необходимо проводить с проверкой на термическую устойчивость.

ПРР. Исходное уравнение $P = \mu S\theta$. Значение P: для катушек постоянного тока $P = I^2r$; для катушек переменного тока $P = I^2r + P_п + P_э$, где $P_п$ — мощность потерь на гистерезис и вихревые токи, $P_э$ — мощность потерь в экране или роторе индукционной системы.

Для системы постоянного тока

$$I^2r = \mu S\theta. \qquad (2\text{-}10)$$

$$r = \rho \frac{l_{ср}\, w^2}{f_к\, l_к\, h_к} 10^{-3}. \qquad (2\text{-}20)$$

Из (2—10) и (2—20) устанавливаем зависимость превышения температуры от н. с. катушки и ее геометрических размеров.

$$\theta = \rho \frac{l_{ср}}{10\, f_к\, l_к\, h_к\, \mu S} (Iw)^2, \qquad (2\text{-}21)$$

где $l_{ср}$, $l_к$, $h_к$ — в *мм*; S — *см²*.

Для круглой катушки можно установить связь между $l_к$ и S:

$$l_{ср} = \frac{\pi (D_н + D_в)}{2} \; (а);\; S = \pi (D_н + D_в)\, l_к \cdot 10^{-2}\; (см^2) \quad (в).$$

Из (2—21) подстановкой *а* и *в* получаем

$$\theta = \frac{\rho}{20\mu\, f_к\, l_к^2\, h_к} (Iw)^2 \qquad (2\text{-}22)$$

КРР. При этом режиме работы катушка может выдержать значительно большие нагрузки, чем при ПРР.

При определении нагрева катушки, включенной в течение небольшого промежутка времени — порядка нескольких секунд — считают, что все тепло, выделенное в катушке, расходуется на нагрев меди, т. е. пренебрегают теплоотдачей во внешнюю среду. Уравнение нагрева катушки в этом случае будет

$$I^2rt = cG\theta, \tag{2-23}$$

здесь t — в секундах;

c — удельная теплоемкость меди в *дж/Г* °С;

G — вес меди в граммах.

Преобразуем выражение (2-23) с тем, чтобы исключить из него величины, не влияющие на нагрев меди:

$$G = \gamma\ l_{cp}\ qw \cdot 10^{-3}, \tag{2-24}$$

где γ — удельный вес;

l_{cp} — в *мм*;

q — в *мм*^{2}.

Подставив (2-16) и (2-24) в (2-23), получаем:

$$I^2\rho \frac{l_{cp}}{q} wt \cdot 10^{-3} = c\gamma\ l_{cp}\ qw\theta \cdot 10^{-3}.$$

Произведя соответствующие сокращения, получим

$$\frac{I^2}{q^2} = \frac{c\gamma\theta}{\rho t},$$

откуда плотность тока

$$j = \frac{I}{q} = \sqrt{\frac{c\gamma\theta}{\rho t}}. \tag{2-25}$$

При повышении температуры меди от ϑ_0 до $\vartheta_{п}$ сопротивление постепенно меняет свое значение. В расчетах принимают во внимание среднее значение ρ.

Таблица 12

Значение допустимой плотности тока для обмотки из меди
(при односекундной нагрузке)

Класс изоляции	*O*	*A*	Компаундированные катушки
$\vartheta_{пр}$, °С	90	105	120
$\theta = \vartheta_{пр} - 35$	55	70	85
j — *а/мм*^{2}	100	108	117

При этом приняты: $c = 0{,}39 \frac{дж}{Г°С}$; $\gamma_{меди} = 8{,}9 \frac{Г}{см^3}$.

При длительности нагрузки t сек. надо значение j разделить на $\sqrt{t}$.

Примеры: 1. Определить сечение медной проволоки с эмалевой изоляцией для некомпаундированной катушки. $I = 0{,}3$ *а*; $t = 3$ *сек*; $\theta = 70°$.

$$j_s = \frac{d_1}{\sqrt{3}} = \frac{108}{\sqrt{3}} = 62{,}2 \ а/мм^2;$$

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{I}{j} = \frac{0{,}3}{62{,}2} \ мм^2,$$

$d = 0{,}079$, принимаем $d = 0{,}08$ ***мм.***

2. Определить допустимую длительность включения t некомпаундированной катушки из проволоки с эмалевой изоляцией при токе $I = 0{,}5$ *а*; $d = 0{,}2$ ***мм***; $\theta = 70°$.

$$q = 0{,}0314 \ мм^2; \ j = \frac{0{,}5}{0{,}0314} = 16 \ а/мм^2;$$

$$t = \left(\frac{108}{16}\right)^2 = 45{,}5 \ сек.$$

Приведенное в данном примере решение применяется для определения допустимой длительности включения катушки переменного тока при разомкнутом якоре, когда ток катушки в несколько раз больше тока при замкнутом якоре электромагнитной системы.

ПКРР. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется величиной относительной продолжительности включения (ОПВ), т. е. отношением длительности рабочего цикла $t_в$ к полному периоду цикла $t_ц$: $\zeta = \frac{t_в}{t_ц}$.

Для катушек, работающих при ПКРР, допускается по сравнению с продолжительным режимом работы (ПРР) значительное увеличение нагрузки. Обозначим: I — ток, протекающий через катушку; $\theta_{пк}$ и $\theta_п$ — установившиеся превышения температуры соответственно при ПКРР и ПРР с нагрузкой $P = I^2 r$.

$$\theta_{пк} = \theta_п \frac{1 - e^{\frac{-t_в}{T}}}{1 - e^{\frac{-t_ц}{T}}} = \zeta' \theta_п, \tag{2-26}$$

где T — постоянная времени нагрева катушки.

Если $t_ц$ значительно меньше постоянной времени нагрева катушки, а следовательно, и $t_в \ll T$, то $\zeta' = \frac{t_в}{t_ц} = \zeta$.

Следовательно,

$$\theta_{пк} = \zeta \theta_п. \tag{2-27}$$

Подставляя значение $\theta_п$ из (2-22), получаем

$$\theta_{пк} = \zeta \frac{\rho}{20 \mu f_к h_к l_к^2} (Iw)^2 \tag{2-28}$$

Возникает вопрос о том, каково же максимальное время, при котором превышение температуры катушки достигает допустимого

значения. Для решения этой задачи воспользуемся общим уравнением нагрева

$$\theta = \theta_{макс}\left(1 - e^{\frac{-t_в}{T}}\right), \tag{2-29}$$

где T — постоянная времени нагрева катушки;

θ — допустимое значение превышения температуры;

$\theta_{макс}$ — максимальное значение превышения температуры, которое имело бы место в катушке при продолжительном ее включении.

Значение $\theta_{макс}$ может быть определено из уравнения нагрузки (2-10), соответствующего продолжительному включению

$$\theta_{макс} = \frac{P}{\mu S}. \tag{2-30}$$

Подставив (2-30) в (2-29), имеем

$$\theta = \frac{P}{\mu S}\left(1 - e^{\frac{-t_в}{T}}\right); \tag{2-31}$$

$$t_в = T \ln \frac{P/\mu S}{P/\mu S - \theta}. \tag{2-32}$$

Далее переходим к определению T.

Как известно, значение постоянной времени нагрева однородного тела равно отношению теплоемкости тела к количеству тепла, отдаваемого во внешнее пространство:

$$T = \frac{cG}{\mu S_к}. \tag{2-33}$$

При нагреве катушки теплоемкость и теплоотдача непостоянны, так как тепло катушки в процессе ее нагрева частично передается стали магнитопровода. Поэтому при учете влияния отдачи тепла стали получается более сложная зависимость для определения T. Для приближенных вычислений можно пользоваться упрощенным выражением постоянной времени нагрева катушки:

$$T = \frac{c_1 G_1 + \beta c_2 G_2}{\mu S_к}, \tag{2-34}$$

где $c_1 G_1$ — теплоемкость меди и изоляции катушки;

μ — коэффициент теплоотдачи;

$S_к$ — сумма внутренней и наружной поверхностей охлаждения катушки;

c_1, G_2 — теплоемкость стали магнитной системы;

β — коэффициент, учитывающий степень передачи тепла от намотки к стали.

Значение коэффициента β определяется условиями теплопередачи от намотки к стали и временем нагрева. По условиям теплопередачи можно рассматривать два крайних случая:

1) хорошая теплопередача от намотки к стали (бескаркасные небандажированные катушки, бескаркасные с намоткой на сердечнике);

2) плохая теплопередача от намотки к стали (каркасные, бескаркасные бандажированные катушки).

Влияние фактора времени на изменение β сильно сказывается в тех системах, где поверхность охлаждения катушки относительно мала. В этом отношении системы характеризуются коэффициентом

$$\gamma = \frac{c_2 G_2}{S_к}. \qquad (2\text{-}35)$$

Так, по опытным данным, при $\gamma \leqslant 1{,}25$ значение β можно считать постоянным за все время нагрева катушки. При $\gamma \geqslant 5$ значение β следует считать в течение первого периода нагрева, равного $\frac{T}{3}$, уменьшенным вдвое, а затем после $t_в > \frac{T}{3}$ принимать полное значение β. В случае $1{,}25 < \gamma < 5$ изменение β принимают пропорциональным числу $5 - 1{,}25 = 3{,}75$. В таблице 13 указаны значения β, определенные на основании приведенных выше опытных данных.

Таблица 13

Значения β

Период нагрева	Хорошая теплопередача			Плохая теплопередача		
	$\gamma \leqslant 1{,}25$	$1{,}25 < \gamma < 5$	$\gamma \geqslant 5$	$\gamma \leqslant 1{,}25$	$1{,}25 < \gamma \leqslant 5$	$\gamma \geqslant 5$
$t_в < \frac{T}{3}$	0,55	$0{,}55\left[0{,}5 + 0{,}5\frac{5-\gamma}{3{,}75}\right]$	0,275	0,45	$0{,}45\left[0{,}5 + 0{,}5\frac{5-\gamma}{3{,}75}\right]$	0,225
$t_в > \frac{T}{3}$	0,55	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45

Пример. Определить допустимую длительность включения $t_в$ бескаркасной катушки с намоткой на сердечнике, рассчитанной для режима повторно-кратковременного включения $\zeta = 0{,}1$; изоляция проволоки — эмаль; потребляемая мощность — 130 *вт* (горячей катушки); вес: меди — 0,4 *кГ*, изоляции — 0,07 *кГ*; стали — 1,7 *кГ*.

Поверхность охлаждения катушки — 200 *см*².

Принимаем: $\theta = 70°$ по шкале A таблицы 8 $\mu = 12{,}19 \cdot 10^{-4}$,

$$\frac{P}{\mu S_к} = \frac{130}{12{,}19 \cdot 10^{-4} \cdot 200} = 532°;$$

$c_1 G_1$ — теплоемкость меди и изоляции:

$$(0{,}4 \cdot 390) + (0{,}07 \cdot 1540) = 264\ \frac{дж}{°C};$$

$c_2 G_2$ — теплоемкость стали равна $1{,}7 \cdot 495 = 840\ \frac{дж}{°C}$.

$$\gamma = \frac{c_2 G_2}{S_к} = \frac{840}{200} = 4{,}2,$$

$$\beta = 0{,}55\left[0{,}5 + 0{,}5\frac{5-\gamma}{3{,}75}\right] = 0{,}334.$$

Постоянные времени катушки:

$t < \frac{T}{3}$;

$$T_1 = \frac{264 + 0,334 \cdot 840}{12,19 \cdot 10^{-4} \cdot 200} = 2250 \text{ сек.}$$

$t > \frac{T}{3}$;

$$T_2 = \frac{264 + 0,55 \cdot 840}{12,19 \cdot 10^{-4} \cdot 200} = 2850 \text{ сек.}$$

Допустимое значение $t_в$ согласно (2—32):

$$t_в = T_1 \ln \frac{\frac{P}{\mu S}}{\frac{P}{\mu S} - \theta} = 2250 \quad \ln \frac{532}{462} = 320 \text{ сек} = 5,34 \text{ мин.}$$

Полный период цикла $t_ц$ должен быть не менее

$$\frac{t_в}{\zeta} = \frac{5,34}{0,1} = 53,4 \text{ мин.}$$

Р К З. При токе короткого замыкания нагрев катушки становится значительно больше допустимого при продолжительном режиме. В данном случае при длительности процесса короткого замыкания, не превышающей 1 секунду, допускается повышенная температура нагрева меди обмотки (до 200°). Свыше этой температуры начинается обугливание изоляции. Понятие термической устойчивости катушки, выражаемое определенным коэффициентом, характеризует допустимую в течение 1 секунды кратность тока в катушке при условии, что при этом предельный нагрев меди обмотки не превысит 200°. Термическая устойчивость, равная 50, обозначает, что катушка с номинальным током $I_н = 5a$ может выдержать в течение 1 секунды ток короткого замыкания, равный 250 *а*. Диаметр проволоки такой катушки определяют, исходя из условия, что все тепло, выделенное в обмотке, расходуется на нагрев меди до 200° (см. выражение (2-25)).

В данном случае

$$\rho_{ср} = 0,024; \quad \theta = 165°;$$

$$j = 155 \text{ а/мм}^2.$$

Пример. Определить диаметр медной проволоки токовой катушки реле: $I_н = 5$ *а*; термическая устойчивость равна 50;

$$q = \frac{I_{кз}}{j} = \frac{250}{155} = 1,61 \text{ мм}^2; \ d = 1,43 \text{ мм.}$$

Принимаем ближайший больший диаметр проволоки по таблице 2.

$$d = 1,45 \text{ мм.}$$

2-15. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА

При расчете катушек стремятся к тому, чтобы выдержать два основных условия:

1) катушка должна обеспечить создание требуемых ампервитков магнитной системы при заданном напряжении или силе тока;

2) температура нагрева намотки катушки не должна превосходить предельно допустимой величины.

При расчете катушки требуется определить ряд данных: длину катушки, толщину намотки, количество витков и сечение проволоки. Для получения этих данных пользуются основными соотношениями, выведенными ранее (2-20), (2-21), (2-25) и (2-28), а также нижеследующими уравнениями.

Уравнение числа витков

$$w = f_к \frac{l_к \cdot h_к}{q}. \qquad (2\text{-}36)$$

Уравнения напряжения:

а) для постоянного тока

$$U = Ir = \rho \frac{l_{ср}}{q} Iw \cdot 10^{-8} \qquad (2\text{-}37)$$

б) для переменного тока

$$U = \sqrt{I^2 r^2 + E^2}, \qquad (2\text{-}38)$$

где

$$E = \omega LI = \omega w^2 GI. \qquad (2\text{-}39)$$

G — магнитная проводимость системы.

Уравнение потока (для систем переменного тока)

$$\Phi = \frac{E}{4{,}44\, fw} \text{ вебер.} \qquad (2\text{-}40)$$

На основе приведенных выше соотношений можно рассчитать катушку определенных заданных размеров. В том случае, если неизвестны габариты катушки, необходимы дополнительные данные, которые получаются при расчете всей магнитной системы в целом.

2-16. ДОПУСКИ И ОТКЛОНЕНИЯ

Точное соблюдение расчетных данных при намотке катушки не всегда удается. Вследствие различных отклонений в размерах проволоки и изоляции и неидентичности самого процесса намотки данные выпускаемых катушек, как правило, отличаются от расчетных. В производстве устанавливаются определенные допуски.

Допуск по сопротивлению. Допускаемое отклонение по величине сопротивления катушки находится в пределах от ± 3 до $\pm 5\%$. Точное соблюдение величины омического сопротивления важно для катушек постоянного тока, так как значение r характеризует потребляемую мощность катушки и, следовательно, ее

тепловой режим. В случае отклонения значения r от указанных допусков катушка доматывается или разматывается.

Допуск по числу витков. Точное соблюдение числа витков важно для катушек переменного тока, так как при определенном сечении стали магнитной системы число витков характеризует потребляемую мощность и число *ав* системы в конечном положении якоря. Значения допускаемых отклонений по числу витков, принятые в практике, приведены в таблице 14.

Таблица 14

Значения допускаемых отклонений по числу витков катушек переменного тока.

Число витков катушки	Допускаемое отклонение
$w > 500$	$\pm 2\%$
$100 < w < 500$	$\pm 1\%$
$w < 100$	0

Допуск по габаритам. На чертеже катушки указывается максимально допустимый наружный диаметр катушки; допускаемые отклонения по внутреннему диаметру колеблются в пределах $\pm(0{,}5 \div 1{,}0)$ *мм*, по длине катушки в пределах $\pm(1-2)$ *мм*.

2-17. ИСПЫТАНИЕ И ПРОВЕРКА КАТУШЕК

Выпускаемые из производства катушки подвергаются поверочным испытаниям. Некоторые испытания проводятся только в специальных случаях, например, при типовых или приемо-сдаточных испытаниях, другие проводятся над каждой выпускаемой катушкой.

Тепловой режим катушек. Проверка нагрева катушек проводится в полностью собранном реле. Применяются два метода испытаний: 1) метод термометра или термопары, которые прикладываются для определения температуры катушки к наружной ее поверхности; 2) метод сопротивления, когда величина превышения температуры катушки определяется по величине изменения сопротивления.

Замер сопротивления катушки производится разными приборами: простым мостом — для сопротивлений, больше 1 *ома*, двойным мостом (если $r < 1$ *ома*), потенциометром, логометром или посредством амперметра и вольтметра. При измерении превышения температуры обмоток из медной проволоки методом сопротивления превышение это определяется по формуле

$$\theta = \vartheta_k - \vartheta_{oг} = \frac{r_г - r_x}{r_x}(235 + \vartheta_{ox} - \vartheta_{oг}), \qquad (2\text{-}41)$$

где ϑ_x — температура нагретой обмотки;

$\vartheta_{oг}$ — температура окружающей среды при нагретой катушке;

ϑ_{ox} — температура окружающей среды при холодной катушке и начальная температура катушки;

r_x — сопротивление обмотки при температуре ϑ_{ox};

$r_г$ — сопротивление обмотки при температуре $\vartheta_к$.

Если испытание производится при температуре окружающей среды, отличной от +35°, то величина превышения температуры, полученная по формуле (2-41), должна быть приведена к +35° путем умножения на коэффициент k.

Для катушек тока

$$k = \frac{270}{235 + \vartheta_{ов}} \qquad (2\text{-}42)$$

для катушек напряжения постоянного тока

$$k = \frac{235 + 2\theta + \vartheta_{ов}}{270 + 2\theta}. \qquad (2\text{-}43)$$

Для катушек напряжения переменного тока применяется та же формула (2-42), что и для катушек тока. Объясняется это тем, что изменение сопротивления в процессе нагрева катушки напряжения переменного тока практически не влияет на величину ее тока. При испытании катушки переменного тока измерение сопротивления производится постоянным током, для чего в момент замера катушка переключается на прибор для измерения сопротивлений. Испытание токовых катушек производится при номинальном токе, а катушек напряжения — при номинальном напряжении.

Диэлектрическая прочность. В цепи магнитной системы в процессе ее эксплуатации возможны значительные перенапряжения, могущие привести к пробою изоляции катушки. Поэтому обязательна проверка диэлектрической прочности каждой катушки перед выпуском ее из производства. Проверка должна осуществляться над катушкой, встроенной в магнитную систему. По нормам испытательное напряжение значительно превосходит рабочее напряжение системы. Длительность испытания — 1 минута. Для ускорения процесса испытания его производят в течение 1 секунды, но при этом испытательное напряжение повышается.

В таблице 15 приведены данные напряжений для проверки на диэлектрическую прочность.

Таблица 15

Значение испытательных напряжений

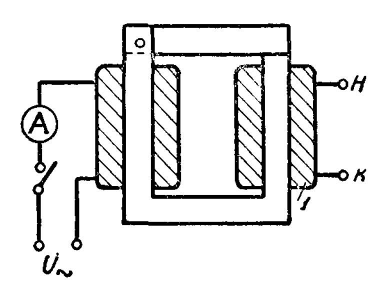
Рабочее напряжение, *в*	Испытательное напряжение, *в*	
	Одноминутное	Односекундное
До 24	250	2500
24—100	500	
101—500	2000	
501—600	$2U + 1000$	
Свыше 600	$2{,}25U + 2000$	

Проверка наличия короткозамкнутых витков. В процессе изготовления катушки возможны случаи оголения изоляции между двумя соседними витками, что приводит к образованию коротко-

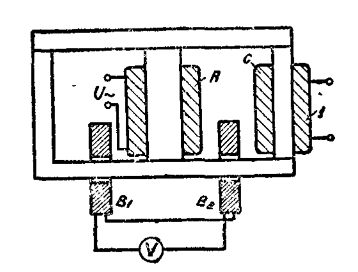
замкнутых витков. Применение таких катушек недопустимо в системах переменного тока, так как в короткозамкнутом витке индуктируется большой ток, виток сильно нагревается, портится изоляция катушки и последняя очень скоро выходит из строя.

В системах постоянного тока возможно применение катушек, имеющих короткозамкнутые витки, если только наличие этих витков не ведет к изменению омического сопротивления катушки. Однако для быстродействующих реле постоянного тока наличие короткозамкнутых витков в катушке вследствие их успокоительного действия также нежелательно.

Простейшее устройство для проверки наличия короткозамкнутых витков показано на фигуре 2, 23. На одном сердечнике магнитной системы насажена катушка возбуждения, включенная на



Фиг. 2, 23. Устройство для выявления к. з. витков:
1 — испытуемая катушка.



Фиг. 2, 24. Устройство для выявления к. з. витков:
1 — испытуемая катушка.

напряжение переменного тока, на другом — испытуемая катушка, концы которой остаются разомкнутыми. До установки испытуемой катушки проверяется ток катушки возбуждения. При насадке испытуемой катушки, не имеющей короткозамкнутых витков, значение этого тока не изменяется; при наличии же короткозамкнутых витков в испытуемой катушке величина тока I значительно повышается.

Схема другого устройства приведена на фигуре 2, 24. На среднем сердечнике Ш-образной системы насажена катушка возбуждения A, приключаемая к сети переменного тока, на ярме системы насажены две балансные катушки B_1 и B_2, включенные на вольтметр. Балансные катушки перед испытанием устанавливают на ярме так, чтобы в них индуктировались одинаковые э. д. с.; при этом показания вольтметра равны нулю.

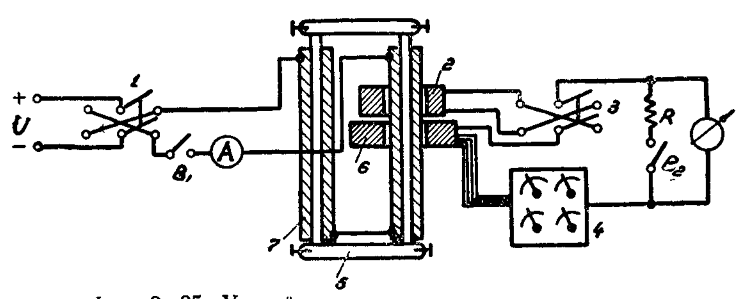
При насадке испытуемой катушки C, в случае наличия в ней короткозамкнутых витков, величины потоков в левой и правой частях магнитной системы уже не будут одинаковыми, и разность э. д. с. катушек B_1 и B_2 становится больше нуля, что показывает вольтметр.

При наличии высокочувствительного вольтметра в описанном устройстве можно выявить повреждение изоляции витков с отно-

сительно большим переходным сопротивлением. При наладке устройства необходимо следить, чтобы съемный якорь всегда устанавливался в одном и том же положении с минимальным зазором. В противном случае возможен небаланс между правой и левой частью и при отсутствии короткозамкнутых витков в испытуемой катушке.

В литературе приводится описание более совершенных современных устройств.

Проверка отсутствия обрывов в катушке производится на устройстве, описанном выше (фиг. 2, 23). Испытуемая катушка замыкается накоротко или через активное сопротивление. При наличии обрыва значение тока I катушки возбуждения остается



Фиг. 2, 25. Устройство для проверки числа витков:

1 — переключатель; 2 — испытуемая катушка; 3 — переключатель; 4 — декадный переключатель; 5 — магнитная система; 6 — стандартная катушка; 7 — катушка возбуждения.

тем же, каким оно было при отсутствии испытуемой катушки, при отсутствии обрыва значение I резко повышается.

Проверка числа витков катушки. Как правило, проверку числа витков катушки производят только периодически, выборочно. Устройства, с помощью которых осуществляется определение числа витков катушки, могут быть весьма точными. Так, имеются устройства с точностью замера до 1 витка на 100 000 витков катушки. Для практических целей выполняют устройства с точностью замера до 1 витка на 5000 витков катушки.

Действие устройства основано на сравнении э. д. с., индуктированных в искомой катушке с неизвестным числом витков и в стандартной — с известным числом витков. Если выполнять устройство так, что число потокосцеплений, созданных какой-то катушкой возбуждения, будет одинаковым для искомой и стандартной катушек, то индуктируемые в них э. д. с. не зависят от их габаритов, а только от числа витков.

Стандартная катушка исполняется с большим числом отпаек, приключаемых к декадному переключателю. В процессе проверки подбирают декадным переключателем такое число витков стандартной катушки, чтобы индуктируемая в ней э. д. с. была равна индуктируемой э. д. с. в искомой. При этом показания чувстви-

тельного гальванометра, включенного в цепь обеих катушек, будут равны нулю. Схема устройства показана на фигуре 2, 25.

Катушка возбуждения представляет собой распределенную обмотку, расположенную на обоих сердечниках магнитной системы. Катушка может быть включена на источник переменного или постоянного тока. В устройствах постоянного тока получаются более точные результаты. Стандартная и искомая катушки насаживаются на одном сердечнике одна под другой. Правильность соединения цепи обеих катушек проверяется предварительно посредством переключателя. Если катушки включены так, что их э. д. с. суммируются, получается большой бросок тока в цепи гальванометра.

ГЛАВА 3

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СО СТАЛЬЮ

Задачей расчета магнитной цепи является вычисление магнитных потоков в разных частях магнитной системы, обусловленных наличием намагничивающей силы F, создаваемой током катушки. При проектировании системы приходится решать обратную задачу: определить н. с. катушки, требуемую для создания в системе магнитных потоков заданной величины.

Для расчета магнитных цепей применяются аналитические и графо-аналитические способы.

При проведении расчетов пользуются основными законами для магнитных цепей, которые совпадают по своей форме с основными законами электрических цепей.

3-1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Магнитная цепь состоит из магнитопровода с насаженной на нем катушкой. Как правило, в магнитопроводе имеется несколько воздушных зазоров: δ_1, δ_2... При наличии магнитного потока в цепи получается падение магнитного потенциала в каждом элементе магнитопровода и в воздушных зазорах.

Для стали

$$Hl = \frac{\Phi}{\mu q_c} l = F_c ; \qquad (3\text{-}1)$$

для воздуха

$$H\delta = \frac{\Phi}{\mu_0 q_в} \delta = F_в, \qquad (3\text{-}2)$$

где μ — магнитная проницаемость стали;

μ_0 — магнитная проницаемость пустоты.

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи формулируется так же, как и для электрической: сумма магнитных потоков, сходящихся в каком-либо узле, равна нулю.

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи — линейный интеграл напряженности магнитного поля или сумма падений магнитных потенциалов для всякой замкнутой магнитной цепи равна сумме н. с. F тех витков или обмоток, через которые проходит рассматриваемая линия.

$$\oint H dl = \Sigma H_i l_i = H_1 l_1 + H_2 l_2 \ldots + H_3 \delta_1 + H_4 \delta_2 = F. \qquad (3\text{-}3)$$

Закон Ома для магнитных цепей — общий поток замкнутой магнитной цепи Φ равен намагничивающей силе катушки F, помноженной на магнитную проводимость всей цепи G. Подставляя (3-1) и (3-2) в (3-3), получаем

$$\Phi = \frac{F}{\frac{l_1}{\mu_1 q_1} + \frac{l_2}{\mu_2 q_2} + \ldots \frac{\delta_1}{\mu_0 q_3} + \frac{\delta_2}{\mu_0 q_4}}. \qquad (3\text{-}4)$$

Обозначая

$$\frac{l_1}{\mu_1 q_1} + \frac{l_2}{\mu_2 q_2} = R_c; \quad \frac{\delta_1}{\mu_0 q_3} + \frac{\delta_2}{\mu_0 q_4} = R_в,$$

имеем из (3-4)

$$\Phi = \frac{F}{R_c + R_в} = \frac{F}{R} = FG, \qquad (3\text{-}5)$$

где R, R_c и $R_в$ — соответственно магнитные сопротивления всей магнитной цепи, стали и воздушных путей потока.

При проведении расчетов приняты

$$\Phi \text{ — в веберах}; \quad G - \frac{вб}{ав}; \quad \mu_0 = 1{,}25 \cdot 10^{-8} \frac{вб}{а \cdot см}.$$

3-2. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

При расчете сложных разветвленных магнитопроводов для удобства определения требуемых соотношений составляют схему замещения магнитной цепи, причем изображение схемы аналогично изображению электрической схемы.

В схеме замещения принимают следующие обозначения. Источник н. с. F обозначают как источник э. д. с. (батарея, генератор), магнитное сопротивление R — как электрическое. Величины и направления потоков магнитной цепи соответствуют величинам и направлениям токов электрической цепи.

Рассмотрим два примера построения схемы замещения.

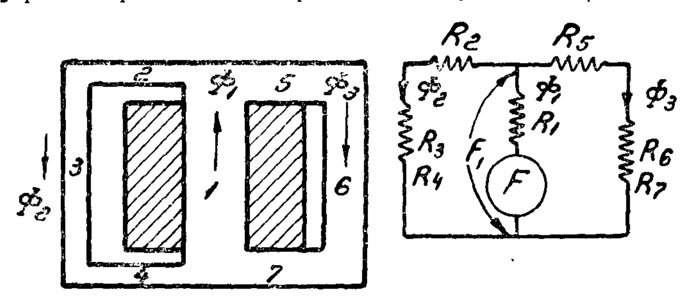
1. Замкнутая магнитная цепь без воздушных зазоров имеет две несимметричные ветви. Для упрощения схемы принимаем, что в магнитной системе отсутствуют потоки утечки. По аналогии с электрической цепью считаем, что под действием н. с. $F = Iw$ создается поток Φ (фиг. 3, 1), протекающий в среднем сердечнике и разветвляющийся на два потока: Φ_2 и Φ_3, причем значения этих потоков определяются одной и той же величиной н. с.:

$$F_1 = F - \Phi_1 R_1.$$

Тогда

$$\Phi_2 = \frac{F - \Phi_1 R_1}{R_2 + R_3 + R_4}; \quad \Phi_3 = \frac{F - \Phi_1 R_1}{R_5 + R_6 + R_7}.$$

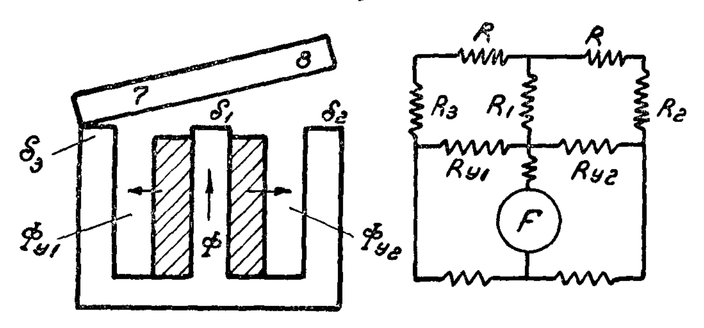
2. Магнитная система реле (фиг. 3, 2). В данной системе зазоры δ_1 и δ_2 рассматриваются как рабочие, а δ_3 — как нерабочий.



Фиг. 3, 1. Магнитная система.

В схеме замещения показаны отдельно сопротивления, соответствующие сопротивлениям воздушных зазоров, и отдельно сопротивления магнитопровода.

Потоки утечки Φ_{y1} и Φ_{y2} от среднего сердечника к крайним распределяются по всей длине сердечника, но в схеме замещения



Фиг. 3, 2. Магнитная система реле.

сопротивления путей потоков утечки показаны в виде активных сопротивлений, включенных за источником н. с., F. При этом следует учитывать приведенные значения магнитных сопротивлений (см. § 3-4).

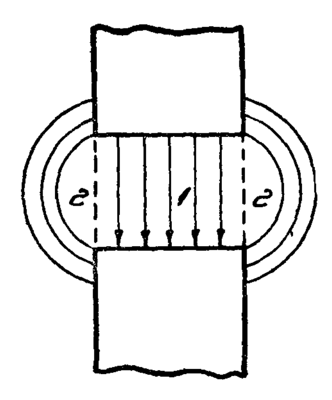
По схеме замещения, пользуясь законами Ома и Кирхгофа для магнитных цепей, можно составить ряд уравнений, из которых определяются значения потоков в разных частях магнитной системы при заданной н. с. катушки.

Также решается и обратная задача: определение требуемой н. с. катушки при заданных значениях рабочих потоков в зазорах δ_1 и δ_2.

Решение задачи несколько усложняется тем обстоятельством, что значение магнитного сопротивления стали не является постоянной величиной, а закон его изменения нелинейный. Поэтому для полного решения задачи приходится прибегать дополнительно к использованию кривых намагничивания материала. В некоторых случаях прибегают к решению задачи методом последовательных приближений (см. § 3-11).

3-3. МАГНИТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ

Методы вычисления проводимости. При расчете магнитной системы важно знать величины магнитных проводимостей воздушных зазоров. Рассмотрим вначале способы вычисления проводимостей воздушных зазоров между двумя эквипотенциальными поверхностями, которыми являются поверхности стальных деталей магнитопровода. Назовём эти поверхности магнитными полюсами.



Фиг. 3,3. Поле между параллельными полюсами.

Простейшим видом поля в воздушном зазоре является однородное поле, которое можно получить между двумя достаточной протяженности параллельными плоскостями — полюсами. В этом случае задача вычисления проводимости зазора решается просто. Однако однородное поле в воздушных зазорах магнитных систем электрических аппаратов и реле наблюдается весьма редко, так как поверхности полюсов имеют различную конфигурацию, полюсы часто располагаются непараллельно друг другу и имеют конечные размеры. Задача определения проводимости воздушных зазоров поэтому связана с рядом сложных вычислений.

Поле между параллельными полюсами конечных размеров (фиг. 3, 3) можно рассматривать состоящим как бы из двух частей: однородного поля *1* и поля *2*, определяемого выпучиванием линий индукции. Поток *2* называют краевым потоком.

В практических расчетах применяется несколько методов определения проводимости.

Аналитический метод. В простейшем случае, при наличии однородного поля между двумя параллельными плоскостями большой протяженности, проводимость воздушного зазора определяется как отношение площади q — сечения потока к длине δ — пути линии поля в воздухе.

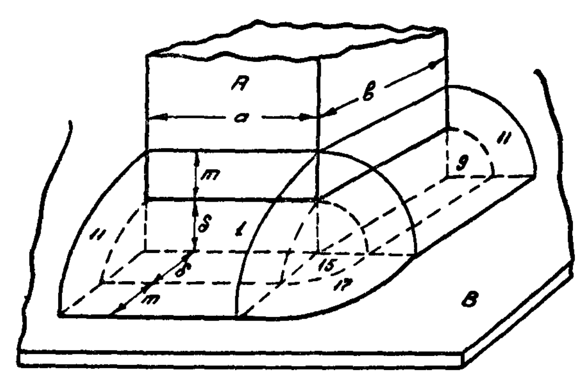
$$G = \mu_0 \frac{q}{\delta} \frac{вб}{а}, \qquad (3\text{-}6)$$

где q — $см^2$; δ — $см$; $\mu_0 = 1{,}25 \cdot 10^{-8} \frac{вб}{а \cdot см}$.

Для сложных случаев, например для вычисления проводимости поля между двумя параллельными цилиндрами или для поля между цилиндром и плоскостью, пользуются соотношениями, выведенными на основе теории поля.

В таблице 16 приведены соответствующие формулы, полученные на основе теории поля.

Метод разбивки поля на простые фигуры. Сущность этого метода заключается в том, что все поле в воздушном зазоре между полюсами разбивается посредством трубок индукции на



Фиг. 3, 4. Пример разбивки поля на простые фигуры:
1 – прямоугольный параллелепипед; 9 – четверть круглого цилиндра; 11 – четверть круглого полого цилиндра; 15 – половина шарового квадранта; 17 – половина квадранта шаровой оболочки.

ряд потоков, причем разбивка производится так, чтобы эти трубки индукции имели форму простых геометрических фигур, например цилиндров, полуцилиндров и т. д.

Проводимость каждой трубки определяется как отношение среднего сечения трубки к средней ее длине. Полная проводимость равна сумме проводимостей отдельных трубок, если приложенная к концам разность магнитных потенциалов остается для всех трубок одинаковой. На фигуре 3, 4 приведен пример такой разбивки. Рассматривается поле между двумя полюсами A и B, причем размеры полюса B (в плане) в несколько раз больше размеров полюса A. Все поле разбивается на такие трубки индукции:

1 — прямоугольный параллелепипед размерами a, b и δ, причем δ — соответствует величине воздушного зазора;

9 — четверть круглого цилиндра с радиусом, равным δ;

11 — четверть полого круглого цилиндра с внутренним радиусом, равным δ, и наружным, равным $\delta + m$, где m — некоторая произвольная величина, принимаемая обычно по опытным данным и равная $(1 + 2)\,\delta$;

15 — половина шарового квадранта;

17 — половина квадранта шаровой оболочки.

Таблица 16

Формулы для вычисления проводимостей воздушных путей

№	Эскиз	Проводимость $G\ \frac{вб}{ав}$; $\mu_0 = 1{,}25 \cdot 10^{-8}\ \frac{вб}{а\ см}$
1 2		Параллельные цилиндры (без учета проводимости краевого потока) $G_1 = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$ (1); $G_2 = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4 \cdot \delta}$ (2)
3		Непараллельные плоскости, расположенные под углом (без учета проводимости краевого потока) $G_3 = \mu_0 \frac{b}{\theta} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dx}{x} = \mu_0 \frac{b}{\theta} \ln \frac{R_2}{R_1}$ (3)
4		Параллельные цилиндры. 1) $G_4 = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln\left(k + \sqrt{k^2 - 1}\right)}$ (4) $R_1 \neq R_2$; $k = \frac{b^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2}$; $R_1 = R_2 = R$; $k = \frac{b^2 - 2R^2}{2R^2}$; 2) при $b > 8R$; $G_{4a} = \mu_0 \frac{\pi l}{\ln b/R}$ (4a)
5		Цилиндр, параллельный плоскости. $G_5 = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln \frac{b + \sqrt{b^2 - R^2}}{R}}$ (5) при $b > 4R$ $G_{5a} = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln 2b/R}$ (5a)
6		Концентрические цилиндры. $G_6 = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln R/r}$ (6) если $r > \delta$, где $\delta = R - r$, то $G_{6a} = \mu_0 \frac{2\pi (r + \delta/2)\, l}{\delta}$ (6a)
7		Цилиндр и концентрические поверхности (без учета проводимости краевого потока) $G_7 = \mu_0 \frac{\theta b}{\ln R/r}$ (7) при $r > \delta$; $G_{7a} = \mu_0 \frac{(r + 0{,}5\delta)\, b\theta}{2\delta}$ (7a)

(продолжение)

№	Эскиз	Проводимость $G\ \frac{вб}{ав}$; $\mu_0 = 1{,}25 \cdot 10^{-8}\ \frac{вб}{а\,см}$
8		Половина цилиндра. Графически: $\delta_{ср} = 1{,}22\delta$; $q_{ср} = \frac{\pi\delta^2 l}{8 \cdot 1{,}22 \cdot \delta} = 0{,}322\delta l$ $G_8 = \mu_0\, 0{,}26 l$ (8)
9		Четверть цилиндра $G_9 = \mu_0\, 0{,}52 l$ (9)
10		Половииа полого цилиндра $\delta_{ср} = \pi\,\frac{\delta + m}{2}$; $q_{ср} = ml$. $G_{10} = \mu_0 \frac{2l}{\pi\left(\frac{\delta}{m} + 1\right)}$ (10)
11		Четверть полого цилиндра $G_{11} = \mu_0 \frac{2l}{\pi\left(\frac{\delta}{m} + 0{,}5\right)}$ (11)
12 13		Тело вращения $G_{12} = \mu_0 \cdot 0{,}26 l = \mu_0\, 1{,}63 r$ (12) $G_{13} = \mu_0 \frac{2l}{\pi\left(\frac{\delta}{m} + 1\right)} = \mu_0 \frac{4r}{\frac{\delta}{m} + 1}$ (13)
14		Шаровой квадрант $\delta_{ср} = 1{,}3\delta$; $V = \frac{\pi}{3}\left(\frac{\delta}{3}\right)^3$; $q = 0{,}1\delta^2$; $G_{14} = \mu_0 \cdot 0{,}077\delta$ (14)
15		Половина шарового квадранта $G_{15} = \mu_0 \cdot 0{,}308\delta$ (15)
16		Квадрант шаровой оболочки $G_{16} = \mu_0 \frac{m}{4}$ (16)
17		Половина квадранта шаровой оболочки $G_{17} = \mu_0 \frac{m}{2}$ (17)

Номера поименованных форм соответствуют обозначениям таблицы 16. В этой же таблице приведены формулы для вычисления проводимостей различных простых фигур.

Расчетно-экспериментальные формулы. Некоторыми авторами на основании ряда расчетов и экспериментальных данных установлено численное влияние краевого эффекта на величину проводимости между плоскими прямоугольными и круглыми полюсами. А. Г. Сливинской на основе проведенных замеров предложены формулы для определения магнитной проводимости между полюсами различных форм — плоскими коническими, усеченными коническими. Б. К. Буль построил расчетные кривые для определения проводимости между плоскими полюсами прямоугольной формы. Шмидель построил ряд опытных кривых для определения проводимости зазора между плоскими полюсами.

Б. К. Буль и Шмидель определяют по формуле однородного поля $G = \mu_0 \frac{a_1 b_1}{\delta}$ проводимость зазора с учетом краевого эффекта; значения a_1 и b_1 являются размерами некоторого фиктивного полюса, отличающимися от действительных размеров a и b.

Графический метод. По этому методу посредством линий индукции и эквипотенциальных линий, построенных на основании данных о значении разности потенциалов между отдельными частями полюсов, поле разбивается на ряд отдельных трубок. Графически определяют среднее сечение и среднюю длину каждой трубки поля и по этим данным проводимость трубки. Общая проводимость воздушного зазора рассчитывается как сумма проводимостей отдельных трубок.

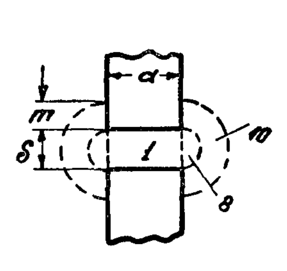
Сравнение методов и область их применения. Наиболее удобным для расчета является аналитический метод. Однако он применим для ограниченного числа случаев, когда для вывода формул можно пользоваться теорией поля.

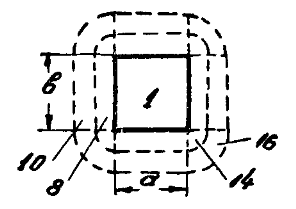
Метод разбивки поля на простые фигуры дает решение задачи, в основном, для всех случаев определения проводимостей между полюсами разных форм. Этот метод дает решение в аналитической форме, поэтому его удобно применять для случаев, когда требуется вычислить ряд значений проводимости, а также производные проводимости по ходу якоря. Несмотря на приближенное решение задачи методом разбивки поля, результат получается в пределах точности, допустимой для практических расчетов.

Расчетно-экспериментальные методы имеют ограниченную область применения, так как в них рассматриваются полюсы только определенной формы. Методы эти дают решение не в аналитической форме и неудобны, поэтому, при расчете проводимостей при меняющемся зазоре, производную проводимости приходится определять графическим дифференцированием, менее точным, чем аналитическое.

Графический метод применяется в тех случаях, когда картина поля весьма сложна, например при вычислении поля между криволинейными поверхностями.

На фигурах 3, 5 до 3,12 приведены примеры вычисления проводимостей воздушных зазоров в различных частях магнитных систем реле. При вычислениях были применены формулы таблицы 16.

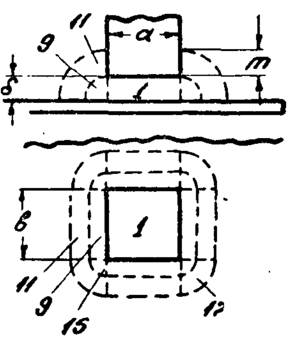




Фиг. 3, 5. Проводимость между прямоугольными полюсами:

$$G = G_1 + G_8 + G_{10} + 4G_{14} + 4G_{16};$$

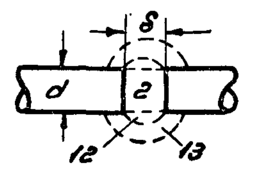
для G_8 и G_{10} : $l = 2a + 2b$; $m = (1 \div 2)\delta$.



Фиг. 3, 6. Проводимость между прямоугольным полюсом — плоскостью:

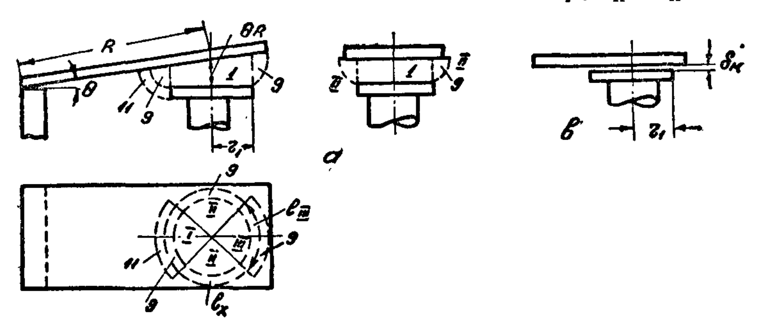
$$G = G_1 + G_9 + G_{11} + 4G_{15} + 4G_{17};$$

для G_9 и G_{11}: $l = 2a + 2b$.



Фиг. 3, 7. Проводимость между двумя круглыми полюсами:

$$G = G_2 + G_{12} + G_{13}.$$



Фиг. 3, 8. Проводимость между якорем и полюсным наконечником:

a — разомкнутое положение якоря:

$$G = G_1 + (G_9 + G_{11})_{I} + 2(G_9)_{II} + (G_9)_{III};$$

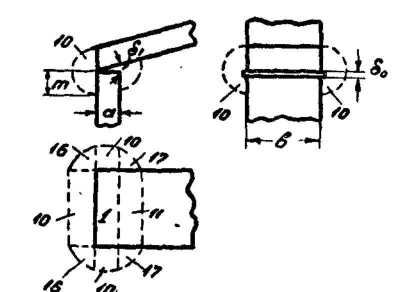
$$G_1 = \mu_0 \frac{\pi r_1^2}{\theta R}; \ \theta - рад;$$

для G_9 и G_{11} вычисляют l_x в каждом квадранте

b — замкнутое положение якоря:

$$G = \mu_0 \frac{\pi r_1^2}{\delta_k},$$

δ_k — при отсутствии немагнитной прокладки — порядка 0,01 *см*.

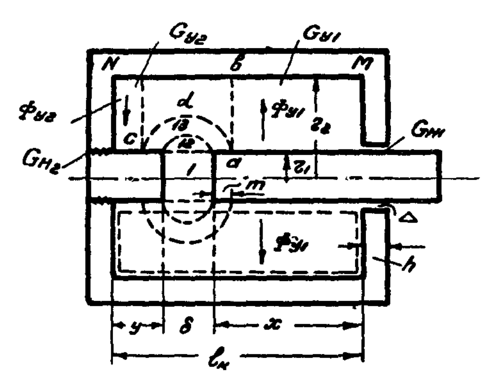


Фиг. 3, 9. Проводимость между якорем и скобой:

$$G = G_1 + G_{10} + G_{11} + G_{16} + G_{17};$$

$$G_1 = \mu_0 \frac{a \cdot b}{\delta}\ ;\ \delta = \frac{\delta_1 + \delta_0}{2}\ ;$$

δ_0 — порядка 0,01 *см.*



Фиг. 3, 10. Прямоходовой электромагнит цилиндрической формы:

$\delta \ll l_к$; δ — полный ход якоря.

a) Проводимости рабочего зазора:

$$G_p = \mu_0 \frac{\pi r_1^2}{\delta} + \mu_0 \cdot 1{,}63 r_1 + \mu_0\, 4 \frac{r_1}{\delta/m + 1}.$$

Значение m определяется из условия равенства максимальной длины силовой линии adc двойного пути якоря к ярму — ab:

$$\pi\left(m + \frac{\delta}{2}\right) = 2\,(r_2 - r_1).$$

b) Проводимости нерабочих зазоров:

$$G_{н1} = \mu_0 \frac{2\pi\,(r_1 + 0{,}5\,\Delta)}{\Delta} h;\ \Delta \text{ — порядка } 0{,}015\ см;$$

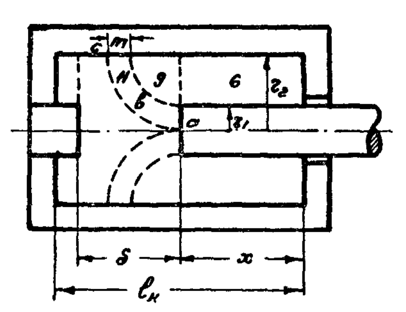
$$G_{н2} = \mu_0 \frac{2\pi\, r_1 \cdot h}{\Delta_0}\ ;\ \Delta_0 \text{ — порядка } 0{,}005\ см.$$

c) Проводимости утечки:

удельная — на 1 *см* длины $g = \mu_0 \dfrac{2\pi}{\ln r_2/r_1}$;

$$G_{y1} = g\ (x - m);\ G_{y2} = g\,(y - m).$$

Приведенные значения проводимостей см. в параграфе 3-4.



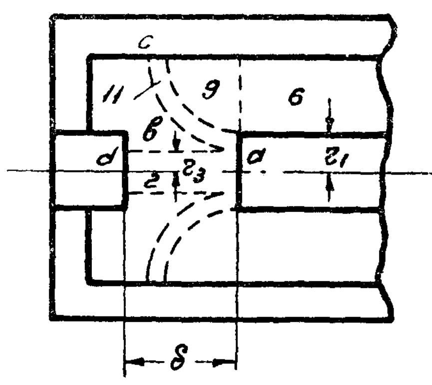
Фиг. 3, 11. Прямоходовой электромагнит цилиндрической формы:

$\delta > abc$; $G_{y_9} = \mu_0 \cdot 4{,}7 \cdot r_1$

(см. таблицу 16).

$G_{y11} = \mu_0 \dfrac{2l}{\pi\left(\dfrac{\delta}{m} + 0{,}5\right)}$; $l = \pi r_1$; $\delta = m = r_1$.

Вычисление приведенных значений G_{y6}, G_{y9} и G_{y11} см. в параграфе 3-4.



Фиг. 3, 12. Прямоходовой электромагнит цилиндрической формы:

$\delta = abc$; $G_2 = \mu_0 \dfrac{\pi r_3^2}{\delta}$; $G_{y_9} = \mu_0\ 4{,}7\ r_1$;

$G_{y11} = \mu_0 \dfrac{2l}{\pi\left(\dfrac{\delta}{m} + 0{,}5\right)}$;

$l = \pi(r_1 + r_3)$; $m = r_1 - r_3$;

r_3 из условия $abc = \delta$.

Вычисление приведенных значений G_{y6}, G_{y9} и G_{y11} см. в параграфе 3-4.

3-4. КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ

Учет распределения потоков. При расчете магнитной цепи необходимо иметь данные о распределении потоков по всему магнитопроводу. За основу принимают значение потока $\Phi_в$ в рабочем воздушном зазоре, и все остальные значения потоков в разных частях магнитопровода выражают в функции $\Phi_в$, для чего пользуются значением коэффициента рассеяния σ. В сложных магнитопроводах приходится учитывать несколько значений σ. Рассмотрим для примера магнитную систему, приведенную на фигуре 3, 13. В плоскости N действует поток $\Phi_в$, а в плоскости M $\Phi_в + \Phi_y$; таким образом,

$$\sigma = \frac{\Phi_в + \Phi_y}{\Phi_в}. \qquad (a)$$

Вычисление значений σ в функции потоков неудобно, так как неизвестны величины этих потоков. Поэтому уравнение (a) преобразовывают так, чтобы выразить σ в функции геометрических размеров магнитопровода.

Если не учитывать падения магнитного потенциала в стали, то значение $\Phi_в$ определяется н. с. катушки F; величина потока Φ_y определяется неполным значением н. с. F', так как н. с. катушки меняется от нуля (плоскость M) до F (плоскость N).

$$\Phi_в = F\frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}; \qquad (b)$$

$$\Phi_y = F'G;\ F' < F.$$

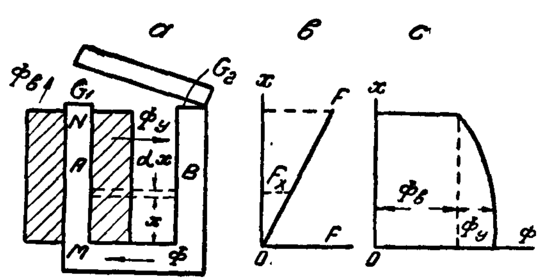
Удобнее пользоваться для вычисления Φ_y значением F, а не F', для чего меняют соответственно значение G_y и пользуются значением G_{yn} — приведенного значения проводимости утечки.

$$\Phi_y = FG_{yn} \quad (c).$$

Из (*a*), (*b*) и (*c*):

$$\sigma = \frac{F\dfrac{G_1G_2}{G_1+G_2} + FG_{yn}}{\dfrac{G_1G_2}{G_1+G_2}F} = 1 + G_{yn}\frac{G_1+G_2}{G_1G_2}. \qquad (3\text{-}7)$$

Полученное значение σ назовем коэффициентом рассеяния по потоку.



Фиг. 3, 13. Распределение потоков в системе.

Учет распределения числа потокосцеплений. При проектировании магнитных систем переменного тока с катушкой параллельного включения приходится дополнительно учитывать коэффициент рассеяния по числу потокосцеплений.

Считая

$$U \cong E = \frac{\omega}{\sqrt{2}}\psi = \frac{\omega}{\sqrt{2}}(\psi_в + \psi_y), \qquad (a)$$

где ψ, $\psi_в$, ψ_y — числа потокосцеплений, соответственно — полное, потока рабочего воздушного зазора и потока утечки.

Коэффициент рассеяния σ_c по числу потокосцеплений

$$\sigma_c = \frac{\psi_в + \psi_y}{\psi_в} = \frac{wF\dfrac{G_1G_2}{G_1+G_2} + wFG_{yc}}{wF\dfrac{G_1G_2}{G_1+G_2}}$$

или

$$\sigma_c = 1 + G_{yc}\frac{G_1+G_2}{G_1G_2}, \qquad (3\text{-}8)$$

где G_{yc} — приведенное значение проводимости, G_y, по числу потокосцеплений.

Вычисление G_{yn} по потоку. Определим значение потока Φ_{yx} на высоте x (фиг. 3, 13). Обозначим: g — удельная магнитная проводимость потока утечки (на 1 *см* длины), вычисленную по

геометрическим размерам системы между сердечником A и ярмом B. Н. с. на высоте катушки x равна

$$F_x = F\frac{x}{l} \quad (a);$$

$$\Phi_{yx} = \int_0^x F_x g\,dx = \frac{Fg}{l}\int_0^x x\,dx = Fg\frac{x^2}{2l} \quad (b)$$

при $x = l$;

$$\Phi_y = Fg\frac{l}{2} \tag{3-9}$$

значение $gl = G_y$ — проводимость потока утечки, вычисленная по геометрическим размерам.

Таким образом,

$$G_{yn} = \frac{gl}{2} = \frac{G_y}{2}. \tag{3-10}$$

Закон изменения потока утечки показан на фигуре 3, 13 *c*. Соотношение (3-10) применимо для ненасыщенных систем, когда максимальное значение индукции в магнитопроводе не превышает $11 \cdot 10^{-5} \div 12 \cdot 10^{-5} \frac{вб}{см^2}$. При большем значении индукции необходимо вводить поправки, учитывающие падение магнитного потенциала в сердечнике.

Согласно данным ряда проведенных расчетов, при которых принято среднее значение μ по всей длине сердечника, величина G_{yn} с учетом поправки

$$G_{yn} = \frac{G_y}{3}. \tag{3-11}$$

Вычисление G_{yc} по числу потокосцеплений. Рассмотрим магнитную систему, приведенную на фигуре 3, 13 *a*. Число потокосцеплений $d\psi$ потока утечки на участке dx, расположенном на расстоянии x от начала катушки, равно потоку $d\Phi_x$, умноженному на число охватываемых им витков w_x:

$$d\psi_x = d\Phi_x w_x = F_x g\,dx\,w_x$$

или

$$\psi_x = \int_0^x d\psi_x = Fwg\frac{x^3}{3l^2} = FwG_{yc}.$$

Таким образом, значение приведенной проводимости по числу потокосцеплений

$$G_{yc} = g\frac{x^3}{3l^2} \tag{3-12}$$

при $x = l$;

$$G_{yc} = \frac{gl}{3}. \tag{3-13}$$

В данном случае значение приведенной проводимости в три раза меньше вычисленной по геометрическим размерам магнитопровода: $G_y = gl$. Если учитывать падение магнитного потенциала в сердечнике, то можно принять

$$G_{yc} = \frac{2}{3}\frac{gl}{3}. \qquad (3\text{-}14)$$

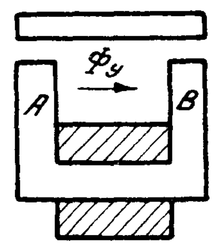
Пример **— прямоходовая магнитная система** (фиг. 3, 10). Определяют два коэффициента рассеяния:

σ_1 — для якоря; σ_2 — для стопа.

$$\sigma_1 = \frac{G_в + G_{yn1}}{G_в}; \quad \sigma_2 = \frac{G_в + G_{yn2}}{G_в}.$$

Таким образом, при заданном потоке $\Phi_в$ получаем: в плоскости $M - \sigma_1\Phi_в$; в плоскости $N - \sigma_2\Phi_в$. Учитывают удельную проводимость потока утечки g:

$$G_{yn1} = g\frac{(x-m)^2}{2l_k}; \qquad G_{yn2} = g\frac{(y-m)^2}{2l_k}.$$



Фиг. 3, 14. Эскиз магнитной системы.

С учетом падения магнитного потенциала в стали

$$G_{yn1} = g\frac{(x-m)^2}{3l_k}; \qquad G_{yn2} = g\frac{(y-m)^2}{3l_k}.$$

Пример **— магнитопровод** (фиг. 3, 14). В данном случае учитывают полное значение G_y, так как разность потенциалов между A и B, если не учитывать падения магнитного потенциала в стали, остается постоянной по всей длине.

3-5. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОТОКА В МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ

В зависимости от соотношения проводимостей воздушных зазоров системы меняется местоположение максимального значения потока в системе. В параграфе 3-3 при определении коэффициента рассеяния было принято, что максимальное значение потока имеет место у основания сердечника, т. е. у начала катушки (фиг. 3, 13).

Другая картина получается при наличии дополнительного воздушного зазора δ_3 между сердечником и ярмом (фиг. 3, 15). В этом случае вследствие падения магнитного потенциала в зазоре δ_3 часть потока утечки Φ_{y2}, возвращается от ярма к сердечнику не у основания, по стали, а частично по воздуху. В такой системе плоскость ab является нейтралью и между точками $a - b$ разность потенциалов равна нулю. Расстояние l_2 нейтрали от основания катушки зависит от соотношения проводимостей воздушных зазоров.

Для определения l_2 построим схему замещения (фиг. 3, 15 *c*), в которой

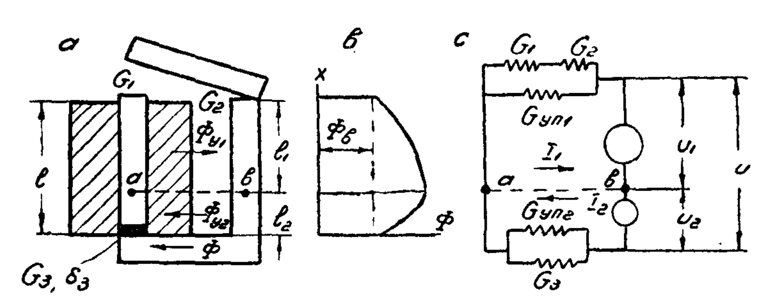
U — напряжение батарей, соответствующее н. с. катушки F.

U_1 — напряжение верхней части батареи, а U_2 — нижней.

$$U_1 = U \frac{l_1}{l}; \tag{3-15}$$

$$U_2 = U \frac{l_2}{l}, \tag{3-16}$$

gl_1 — gl_2 — соответственно приведенные проводимости утечки для верхней и нижней частей сердечника.



Фиг. 3, 15. Схема для определения местоположения максимального значения потока.

В нейтральном слое суммарные потоки верхней части магнитопровода должны быть равны суммарным потокам нижней части и направлены в разные стороны. Это условие выражается в схеме замещения.

$$I_1 = -I_2; \tag{3-17}$$

$$G = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2}; \; U_1 \left(G + \frac{gl_1}{2}\right) = U_2 \left(G_3 + \frac{gl_2}{2}\right). \tag{3-18}$$

Учитывая (3-16) и (3-17), получаем

$$U \frac{l_1}{2l} (2G + gl_1) = U \frac{l_2}{2l} (2G_3 + gl_2). \tag{3-19}$$

Так как $l = l_1 + l_2$ (3-19), решая (3-18) и (3-19) совместно, получаем

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{2G_3 + gl}{2G + gl}. \tag{3-20}$$

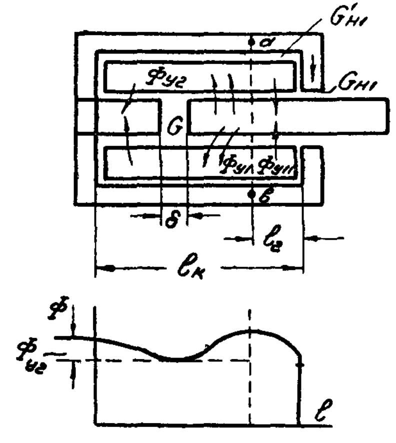
При зазоре $\delta_3 = 0$; $G_3 = \infty$, величина $l_2 = 0$. Этот случай соответствует системе, показанной на фигуре 3, 13. При наличии зазора δ_3, с уменьшением δ нейтраль перемещается кверху.

При выводе (3-20) не принято во внимание падение магнитного потенциала в стали, что допустимо для ненасыщенных систем.

Влияние смещения нейтрали на работу реле.

а) В системах с поворотным якорем зазор δ_3 всегда мал сравнительно с зазором δ_1, смещение нейтрали невелико, и в практических расчетах принимают, что максимум потока расположен у основания катушки.

б) В прямоходовых системах смещение нейтральной плоскости оказывает существенное влияние на величину силы на якоре: значение соленоидной силы зависит от потоков Φ_{yI} и Φ_{yII}, направленных в разные стороны (фиг. 3, 16). При уменьшении зазора δ нейтраль *ab* смещается к этому зазору, поток Φ_{yI} уменьшается, а Φ_{yII} увеличивается, в результате чего значение соленоидной силы резко падает. При величине $\delta_1 < 0{,}1 l_k$ значением соленоидной силы пренебрегают.



Фиг. 3, 16. Распределение потоков в прямоходовой системе.

Ниже приводится приближенная формула для определения значения l_2.

$$l_2 = \frac{l(2G + gl_к)}{2(G + G_{н1} + gl_к)}, \qquad (3\text{-}21)$$

где G — проводимость рабочего зазора.

3-6. ПАДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В СТАЛИ И В ЗАЗОРАХ

При расчете магнитной цепи вычисляют падение магнитного потенциала в рабочих и нерабочих зазорах, а также во всех частях магнитопровода.

а) Падение в стали. Для каждого элемента магнитопровода — скобы, сердечника, якоря — вычисляют индукцию B_c для этого элемента и находят по кривой намагничения напряженность магнитного поля для данного материала, т. е. падение н. с. на 1 *см* длины стали. Падение н. с. на данном участке стального магнитопровода длиной l_1:

$$F_{c1} = H_1 l_1,$$

где l_1 — в *см*.

В некоторых элементах магнитопровода значение индукции неодинаково по всей их длине. Так, в сердечнике электромагнита, изображенного на фигуре 3, 13, индукция B_{c1} в верхней части (у рабочего зазора) меньше значения индукции B_{c2} — внизу, что объясняется наличием потоков утечки. С достаточной для прак-

тических целей точностью падение н. с. в сердечнике определяется по среднему значению напряженности поля:

$$F_c = \frac{H_1 + H_2}{2} l_c, \quad (3\text{-}22)$$

где H_1 — напряженность поля, соответствующая индукция B_{c1}, а H_2 соответствующая B_{c2}.

При определении H для систем переменного тока следует принимать во внимание амплитудное значение индукции в стали B. Далее нужно учитывать, что в шихтованных магнитных системах, применяемых, как правило, для электромагнитов переменного тока, сечение q детали не соответствует сечению стали, так как между отдельными листами шихтовки имеется изоляционная прослойка, необходимая для уменьшения потерь на гистерезис и вихревые токи. Каждый лист стали магнитопровода оклеивается с одной стороны бумагой толщиной 0,032 *мм* или покрывается слоем лака толщиной 0,02 *мм*. Покрытие слоем лака дает лучшее решение, так как пленка лака негигроскопична и более устойчива механически.

При определении значения индукции в стали шихтованного магнитопровода учитывают коэффициент заполнения шихтовки. Принимают $k = 0{,}95$ — для листов, покрытых лаком; $k_c = 0{,}90$ — для листов, оклеенных бумагой.

Таким образом,

$$B = \frac{\Phi}{k_c q}, \quad (3\text{-}23)$$

где Φ — амплитудное значение потока;
q — сечение детали в *см*²;
B — амплитудное значение индукции, $\frac{вб}{см^2}$;

б) Падение в воздушных зазорах. Помимо рабочего воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита, названного так потому, что момент на якоре создается потоком, протекающим в этом зазоре, имеются еще и нерабочие зазоры, где также теряется определенная часть н. с. Так, нерабочим считается зазор между якорем и ярмом. Кроме того, в магнитной системе имеется нерабочий зазор в стыке между сердечником и скобой (ярмом) (фиг. 3, 17), который определяется неточностью изготовления цапфы сердечника и отверстия скобы, а также толщиной покрытия цинком обеих деталей. Следует также учитывать нерабочий зазор между сердечником и полюсным наконечником (фиг. 3, 17 *с*).

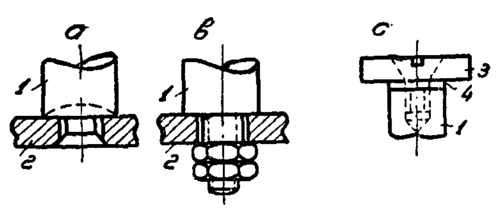
На основании практических данных принимают следующие значения нерабочих зазоров в стыках двух неподвижных деталей:

1) при соединениях, исполненных по нормальному технологическому процессу, 0,05 *мм*;

2) при соединениях, исполненных с применением давления порядка 200 *кГ/см²*, зазор считают практически равным нулю;

3) конечный рабочий зазор между притянутым якорем и сердечником считают также равным 0,05 *мм*.

Стальные детали магнитопровода (за исключением шихтованных магнитопроводов) обычно оцинковывают, причем слой цинка

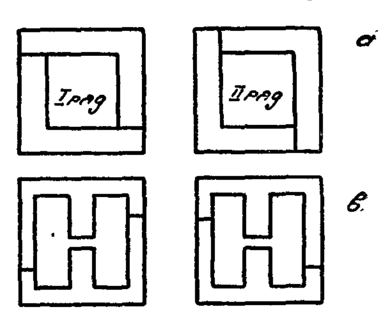


Фиг. 3, 17. Конструктивные элементы магнитопровода: 1 — сердечник; 2 — ярмо; 3 — полюс; 4 — немагнитная прокладка.

в среднем бывает порядка 15 микрон. Таким образом, при сопряжении двух оцинкованных стальных деталей следует учитывать немагнитный слой толщиной $\delta = 0{,}05 + 2 \cdot 0{,}015 = 0{,}08$ *мм*.

В некоторых случаях этот зазор искусственно увеличивают применением штифтов или прокладок из немагнитного материала (фиг. 3, 17 *c*).

Шихтованные магнитные системы для дроссельных катушек и вспомогательных трансформаторов исполняют так, чтобы уменьшить потери н. с. в стыках. На фигуре 3, 18 *a* приведен пример такого магнитопровода. Отдельные листы штампуются несимметричной формы. При наложении одного ряда листов на другой получается такой магнитопровод, что поток от одного листа к другому проходит в основном не по стыку между листами одного ряда, а через листы соседнего ряда. Ввиду большой проводимости зазора между плоскостями листов двух соседних рядов потери н. с. получаются незначительными. Если требуется исполнение дросселя с фиксированным воздушным зазором, магнитопровод исполняется так, как показано на фигуре 3, 18 *b*.



Фиг. 3, 18. Примеры шихтовки магнитных систем.

Падение н. с. в воздушном зазоре определяется по формуле

$$F = \frac{\Phi}{G}, \qquad (3\text{-}24)$$

где Φ — поток в веберах;

G — проводимость зазора в $\frac{вб}{ав}$.

3-7. КРИВЫЕ ПРОВОДИМОСТЕЙ

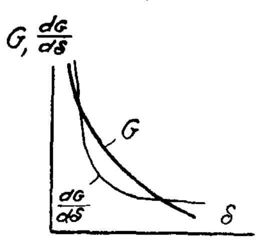
Для вычисления электромагнитных сил, действующих на якорь, и построения тяговой характеристики электромагнитного реле необходимо иметь данные проводимостей воздушных зазоров, изменяющихся по ходу якоря, а также значение производной этой проводимости для разных положений якоря.

Определить значения $\frac{dG}{d\delta}$ или $\frac{dG}{d\theta}$ можно двумя путями: аналитическим или графическим. Наиболее удобное и точное решение задачи получается при аналитическом методе.

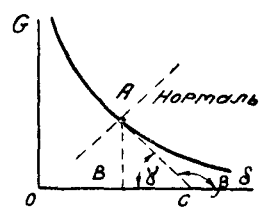
Рассмотрим для примера проводимость между двумя прямоугольными стержнями (фиг. 3, 5).

$$G = 1{,}25 \cdot 10^{-8}\left[\frac{ab}{\delta} + 0{,}26(2a+2b) + 0{,}64\frac{2a+2b}{\delta/m+1} + \right.$$
$$\left. + 0{,}306\delta + m\right];$$
$$\frac{dG}{d\delta} = 1{,}25 \cdot 10^{-8}\left[-\frac{ab}{\delta^2} - 0{,}64\frac{2a+2b}{m\left(\frac{\delta}{m}+1\right)^2} + 0{,}306\right].$$

Для графического определения производной проводимости необходимо построить предварительно кривую $G = f_1(\delta)$ (фиг. 3, 19) или $G = \varphi_1(\theta)$ и затем провести операцию графического дифференцирования. Проводят касательные к отдельным точкам кривой $G = f_1(\delta)$ (фиг. 3, 20).



Фиг. 3, 19. Кривые проводимостей.



Фиг. 3, 20. Графическое определение производной проводимости.

Если m — масштаб оси ординат, а n — оси абсцисс, так что $G = \frac{AB}{m}$ и $\delta = \frac{OB}{n}$, то

$$\frac{dG}{d\delta} = \frac{n}{m}\frac{d(AB)}{d(BC)} = \frac{n}{m}\operatorname{tg}\beta = -\frac{n}{m}\operatorname{tg}\gamma.$$

Найдя значение $\frac{dG}{d\delta}$ для разных значений δ, строят кривую (фиг. 3, 19).

Для проведения касательной к кривой $G = f_1(\delta)$ находят вначале положение нормали к кривой в требуемой точке. Для этого

пользуются узкой полоской зеркала, которую ставят поперек кривой так, чтобы кривая и ее зеркальное отображение составляли одну плавную, без излома, кривую. Это положение зеркала определяет нормаль к кривой; касательная же к кривой будет перпендикулярна к нормали.

3-8. ПОТЕРИ В СТАЛИ МАГНИТОПРОВОДА

Полные потери складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи: $P_n = P_г + P_в$. Величина потерь на вихревые токи зависит от индукции в системе, качества и толщины материала.

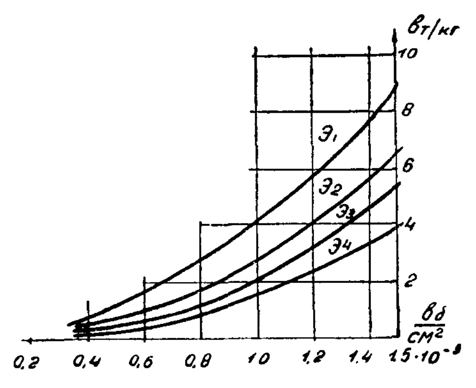
В ГОСТ 802—41 приводятся данные удельных потерь $\frac{вт}{кГ}$ для разных марок листовой электротехнической стали при индукциях

$$B_1 = 1.10^{-4}\frac{вб}{см^2}$$

и

$$B_{1,5} = 1,5.10^{-4}\frac{вб}{см^2}$$

при 50 *гц*.



Фиг. 3, 21. Кривые полных потерь для легированной стали 0,5 *мм*, 50 *гц*.

При практических расчетах для индукции $B > 1.10^{-4}\frac{вб}{см^2}$ пользуются следующими упрощенными формулами:

$$P_г = \sigma_г \frac{f}{100} B^2 \left(\frac{вт}{кГ}\right); \qquad (3\text{-}25)$$

$$P_в = \sigma_в \left(\frac{f}{100} B\right)^2 \left(\frac{вт}{кГ}\right). \qquad (3\text{-}26)$$

Данные значений коэффициентов $\sigma_г$ и $\sigma_в$ для 50 *гц* приведены в таблице 17, кривые полных потерь для листовой электротехнической стали — на фигуре 3, 21.

Таблица 17

Значение коэффициентов $\sigma_г$ и $\sigma_в$.

Марка стали	Э1				Э2	Э3	Э3а	Э4	Э4А	Э4АА
Толщина материала, *мм*	2,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Коэффициент $\sigma_г$	4,4	4,4	4,4	4,4	3,6	3,2	2,85	3,0	2,6	2,4
» $\sigma_в$	89,6	50,5	22,4	5,6	3,2	2,9	2,3	1,2	1,2	1,0

Следует учитывать, что данные, приведенные в ГОСТ и в таблице 17, относятся к отдельным листам стали. В собранном пакете магнитопровода потери получаются значительно большими (в 2,5—3 раза), что объясняется наклепом при штамповке, наличием заусениц, а также заклепок в пакете.

При термической обработке пакета потери снижаются.

3-9. ТОКИ И ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ КАТУШЕК

При расчете магнитной системы необходимо вычислить значения тока в катушке и потребляемой катушкой мощности. Для систем постоянного тока эта задача решается весьма просто. Значительно более громоздкое решение получается для магнитных систем переменного тока.

В этом случае ток катушки равен

$$I = \sqrt{(I_{\mu в} + I_{\mu c})^2 + (I_n + I_э)^2}, \qquad (3\text{-}27)$$

где $I_{\mu в}$ и $I_{\mu c}$ — составляющие тока намагничивания для воздушных зазоров и для стали;

I_n — составляющая тока катушки для компенсации потерь на гистерезис и вихревые токи в стали;

$I_э$, I_p — составляющие тока для компенсации потерь в короткозамкнутом витке электромагнитной системы — экране, или в роторе индукционной системы.

Значения указанных токов зависят от потоков системы, являющихся функцией э. д. с. катушки. Обычно в магнитных системах с катушкой напряжения электрическое сопротивление катушки в несколько раз меньше индуктивного. Поэтому в предварительных расчетах принимают, что все приложенное к катушке напряжение уравновешивается противодействующей э. д. с.

Так, если активное падение напряжения

$$Ir = 0{,}1U,$$

то индуктивное

$$Ix = U\sqrt{1 - 0{,}1^2} = 0{,}995U,$$

при

$$Ir = 0{,}2U; \quad E = 0{,}98U.$$

В тех случаях, когда к катушке приложено синусоидальное напряжение, изменение тока, как известно, происходит не по синусоиде. Однако для практических расчетов принимается допущение, что сила тока изменяется также на синусоиде.

Составляющая тока намагничивания для воздушных зазоров $I_{\mu в}$. Значение $I_{\mu в}$ может быть определено из соотношения

$$\sqrt{2} \cdot I_{\mu в} wG = \Phi, \qquad (3\text{-}28)$$

где $I_{\mu в}$ — действующее значение тока в амперах;

Φ — амплитудное значение потока в веберах;

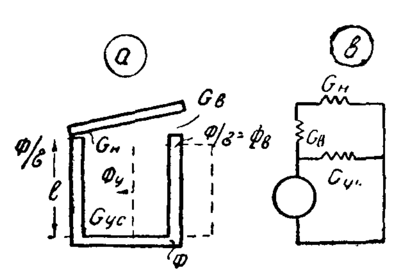
G — проводимость воздушного зазора $\frac{вб}{ав}$;

При наличии в магнитной системе нескольких воздушных зазоров и путей утечки значение G в (3-28) представляет собой полную приведенную для всех путей потока проводимость по воздуху. При этом учитывают приведенную по числу потокосцеплений проводимость утечки $G_{ус}$.

В ряде случаев для вычисления $I_{\mu в}$ удобнее пользоваться соотношением

$$I_{\mu в} = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{\omega w^2 G}. \qquad (3\text{-}29)$$

Примеры вычисления полной проводимости для разных форм магнитных систем приведены на фигурах 3, 22; 3, 23; 3, 24.



Фиг. 3, 22. Магнитная система переменного тока с поворотным якорем:

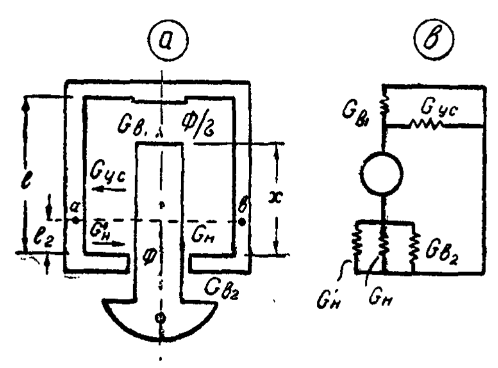
$$G = \frac{G_в \cdot G_н}{G_в + G_н} + G_{ус}; \quad \sigma = \frac{\Phi}{\Phi_в};$$

$G_{ус} = \frac{gl}{3}$ — для ненасыщенных систем;

$G_{ус} = \frac{2}{3}\frac{gl}{3}$ — для насыщенных систем.

Фиг. 3, 23. Магнитная система переменного тока с Ш-образным магнитопроводом:

$$G = \frac{G_1\,(G_2 + G_3)}{G_1 + G_2 + G_3} + 2G_{ус}.$$



Фиг. 3, 24. Прямоходовая магнитная система переменного тока.

$G_1 = G_{в1} + G_{ус}$;

$G_2 = G_н + G'_н + G_{в2}$;

$$G = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}.$$

ab — линия нейтрали для потоков утечки.

Составляющая $I_{\mu c}$. Эта составляющая определяется напряженностью поля H, которую находят по кривой намагничивания для данного значения индукции в стали B_c. При вычислении индукции B_c учитывается распределение потока в магнитопроводе.

Для данного участка магнитопровода $B_{ci} = \frac{\Phi}{k_c q_i}$.

Падение магнитного потенциала в магнитопроводе $F_c = \Sigma H_i l_i$,

ток $I_{\mu c} = \frac{F_c}{w}$. (3-30)

Составляющая I_n. Вычисляется значение потерь в ваттах на гистерезис и вихревые токи, P_n.

$$I_n = \frac{P_n}{U}. \quad (3\text{-}31)$$

Составляющая $I_э$ или I_p. Вычисляется мощность потерь в экране, $P_э$, или в роторе индукционной системы, P_p.

$$I_э = \frac{P_э}{U}. \quad (3\text{-}32)$$

Коэффициент мощности. Угол φ между вектором напряжения сети U и вектором тока катушки определяется из соотношения

$$\cos\varphi = \frac{P + P_n + P_э}{UI}, \quad (3\text{-}33)$$

где $P = I^2 r$ — активные потери в катушке.

Мощность, потребляемая токовыми катушками. Вычисляется кажущаяся мощность UI. Эту величину важно знать при включении катушки во вторичную цепь измерительных трансформаторов тока.

По данным расчета системы известны значения I, Φ, w, r. Тогда

$$E = \frac{\omega\Phi w}{\sqrt{2}}; \ U_c = \sqrt{E^2 + (Ir)^2},$$

где U_c — падение напряжения на зажимах катушки. Тогда

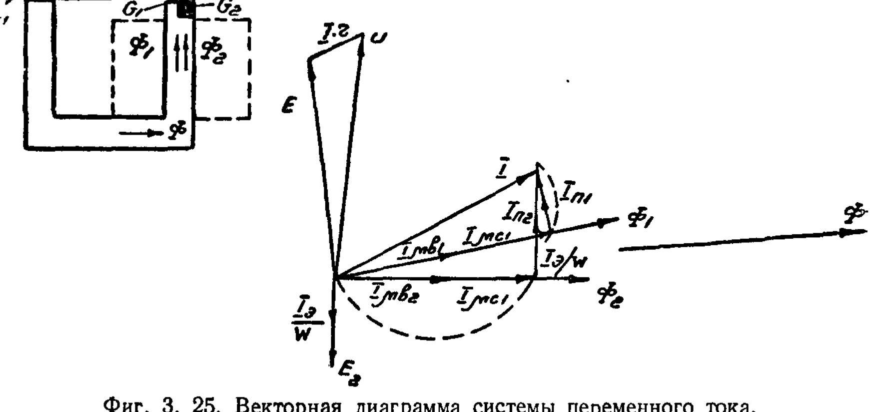
$$U_c I = I\sqrt{E^2 + (Ir)^2}. \quad (3\text{-}34)$$

Данные для построения векторной диаграммы сложного магнитопровода. При построении векторных диаграмм сложных магнитопроводов, например систем реле переменного тока с экраном или тангенциальных индукционных систем, необходимо учитывать, что поток Φ основной части системы распределяется в системе на отдельные потоки. В этом случае падение магнитного потенциала и потери в стали зависят не от отдельных потоков, а от общего.

Рассмотрим для примера магнитную систему электромагнитного реле с экраном (фиг. 3, 25). Составляющие тока для потока $\Phi_1 : I_{\mu в 1}$, $I_{\mu c 1}$ и I_{n1}.

1) $I_{\mu в1}$ — определяется по потоку Φ_1 и проводимостям G_1 и $G_н$;

2) $I_{\mu c1}$ — определяется по потоку Φ, т. е. при нахождении по кривой намагничивания материала значения H учитывают значение индукции B, а не B_1. Ту же составляющую $I_{\mu c1}$ принимают и для потока Φ_2.



Фиг. 3, 25. Векторная диаграмма системы переменного тока.

3) $I_{п1}$ — находят значение потерь $P_п$, определяемых потоком Φ. Далее, эти потери распределяют пропорционально потокам:

$$P_1 = P_п \frac{\Phi_1}{\Phi}; \quad P_2 = P_п \frac{\Phi_2}{\Phi}.$$

3-10. КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Для расчета электромагнитов и анализа их работы пользуются кривыми намагничивания и размагничивания системы, т. е. кривыми $\Phi = f(F)$. При расчете магнитной системы рассматриваются следующие потоки:

$\Phi_р$ — рабочий поток в рабочем воздушном зазоре;

$\Phi_к$ — краевой поток в рабочем воздушном зазоре;

$\Phi_у$ — поток утечки.

Вся н. с. катушки F распределяется в магнитной системе на падение н. с. в рабочем зазоре — $F_р$, в нерабочих зазорах $F_н$ и в стали F_c:

$$F = F_р + F_н + F_c.$$

В зависимости от требований расчета применяется два варианта кривых намагничивания и размагничивания.

1. Кривая представляет собой зависимость потока в рабочем зазоре от падений н. с. в стали и нерабочих зазорах:

$$\Phi_в = \Phi_р + \Phi_к = f(F_c + F_н).$$

2. Кривая представляет собой функцию потока в рабочем зазоре от н. с. всей катушки:

$$\Phi_в = \Phi_р + \Phi_к = f(F_р + F_н + F_с).$$

Ниже рассматриваются примеры построения таких кривых.

а) **Кривые намагничивания.** *Вариант 1.* Рассмотрим пример построения кривой

$$\Phi_в = \Phi_р + \Phi_к = f(F_н + F_с).$$

Поток распределяется в магнитопроводе неравномерно: при определенном значении потока в рабочем воздушном зазоре получаются разные значения потока в отдельных частях магнитопровода.

При построении кривой задаются определенным значением потока в рабочем зазоре, а значения потоков в других частях магнитопровода устанавливают в функции этого потока умножением на коэффициент рассеяния σ. Значение σ изменяется при ходе якоря; так, в разомкнутой системе $\sigma = 1{,}8 - 3$, в замкнутой — $\sigma = 1{,}05 - 1{,}1$.

При расчете электромагнита вычисляют значения сил или моментов для нескольких положений якоря: начального (разомкнутая система), конечного и промежуточного. Вследствие меняющегося при этом значения σ и величин нерабочих зазоров приходится строить несколько кривых намагничивания, соответственно принятым для расчета положениям якоря.

Методы вычисления проводимости воздушных зазоров приведены в параграфе 3-3, а падений н. с. в стали — в параграфе 3-6.

На фигуре 3, 26 приведена магнитная система с поворотным якорем и кривая намагничивания для нее:

$$\Phi_в = f(F_н + F_с).$$

К нерабочим относятся в рассматриваемой системе зазоры с проводимостями: G_2 и G_4 — неизменяющимися по ходу якоря, G_3 — изменяющейся по ходу якоря.

Для построения кривой задаются произвольно несколькими значениями потоков в рабочем воздушном зазоре. Пользуясь коэффициентом рассеяния σ, вычисляют значение потоков в разных частях магнитопровода при принятых значениях $\Phi_в$. Все данные расчета сводят в таблицу 18.

Пользуясь кривой намагничивания, изображенной на фигуре 3, 26, можно решить следующие задачи.

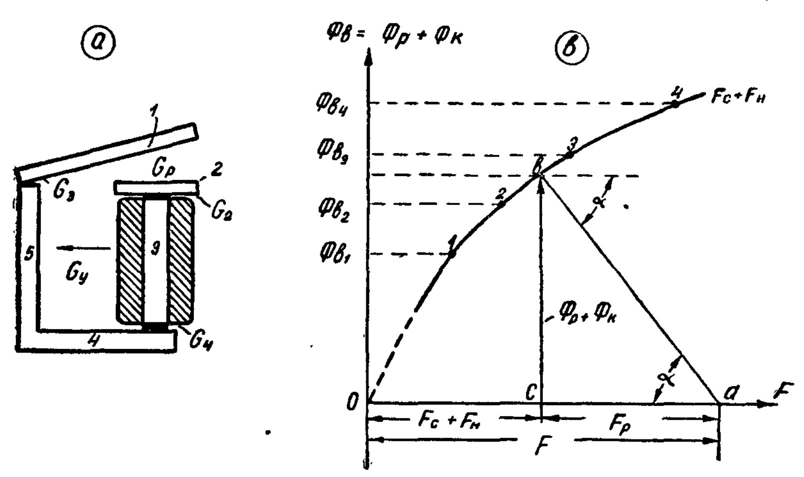
1. Определить значение потока $\Phi_р$ при заданном значении н. с. катушки и заданной проводимости рабочего зазора $G_р + G_к$.

Откладывают на оси абсцисс отрезок oa, соответствующий н. с. катушки, из точки a проводят прямую ab под углом α, причем $\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_р + G_к}{p}$, ($p$ — отношение масштабов оси ординат

и абсцисс; пример вычисления p см. стр. 111). Отрезок bc определяет собой величину потока в рабочем зазоре $\Phi_в$.

Значение $\Phi_р = \Phi_в \frac{G_р}{G_р + G_к}$.

Падение н. с. в системе распределяется следующим образом: отрезок oc дает значение $F_c + F_н$, а отрезок ca — $F_р$. Угол α является функцией проводимости рабочего зазора.



Фиг. 3, 26. Магнитная система и кривая ее намагничивания. Вариант $\Phi_в = f_1 (F_c + F_н)$.

Согласно фигуре 3, 26 имеем:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Phi_в}{F_р};\ \text{но}\ \frac{\Phi_в}{\Phi_р} = G_р + G_к,$$

следовательно,

$$\operatorname{tg}\alpha = G_р + G_к,$$

или, с учетом масштабов,

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_р + G_к}{p}.$$

2. По заданному потоку $\Phi_в$ и проводимости $G_р + G_к$ найти значение требуемой н. с. катушки.

Из точки b кривой намагничивания, соответствующей значению $\Phi_в$, проводят прямую ba под углом α, причем $\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_р + G_к}{p}$. Полученный отрезок oa соответствует F катушки.

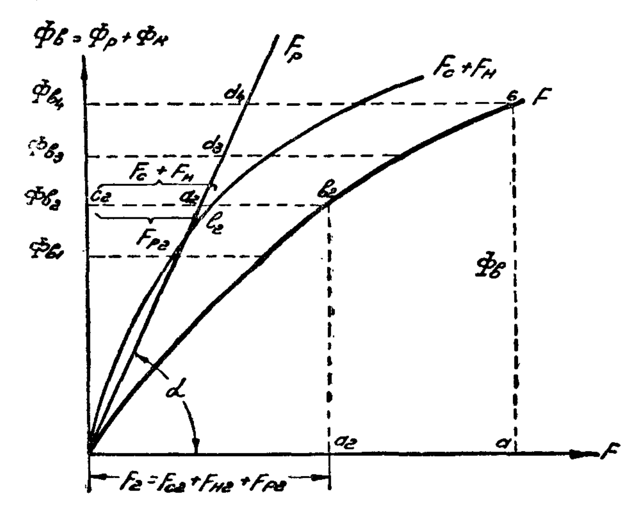
Вариант 2. Построение кривой $\Phi_р + \Phi_к = f(F_c + F_н + F_р)$. Построение проводим для магнитной системы, приведенной на фигуре 3, 26.

Аналогично первому варианту вначале строят кривую $\Phi_p + \Phi_к = f(F_н + F_c)$ (фиг. 3, 27), далее под углом $\alpha \left(\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_p + G_к}{p}\right)$ проводят прямую od.

Для каждого заданного значения $\Phi_в$ отрезок d_2c_2 характеризует значение F_p, так как

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{oc_2}{d_2c_2} = \frac{\Phi_{в2}}{F_{p2}} = G_p + G_к.$$

Для получения результирующей кривой намагничивания складывают отрезки cd и ce.



Фиг. 3, 27. Кривая намагничивания. Вариант $\Phi_в = f_2(F)$.

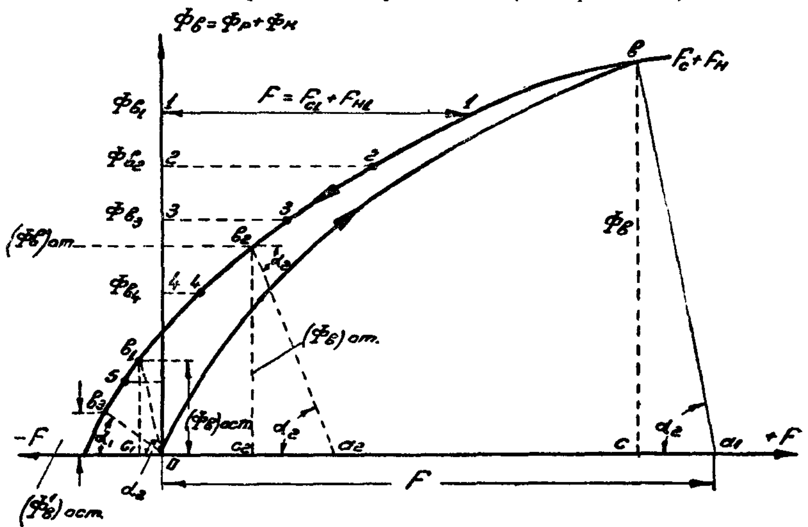
Кривая второго варианта также позволяет решить задачу определения потока $\Phi_в$ по заданной н. с. катушки. Однако решение второй задачи — определение н. с. катушки по заданному потоку и проводимости $G_p + G_к$ — в данном случае затруднительно. Поэтому в практике чаще применяют кривые первого варианта.

б) Кривые размагничивания. Пользуясь кривыми размагничивания, устанавливают закон снижения потока при уменьшении н. с. катушки, а также вычисляют значение остаточного потока в магнитной системе при $F = 0$. Обычно интересуются кривой размагничивания при притянутом положении якоря, т. е. при минимальном значении рабочего зазора.

Вариант 1. При построении кривой необходимо знать величину начального потока $\Phi_в$, от которого начинается размагничивание, т. е. максимальное значение потока, получающееся в рабочем воздушном зазоре при замкнутом якоре и при наличии полной н. с. Эту величину $\Phi_в$ определяют по кривой намагни-

чивания. На фигуре 3, 28 приведена кривая размагничивания. Задаются несколькими начальными значениями потока: $\Phi_{в1}$, $\Phi_{в2}$ (точки *1*, *2*, *3*, *4* ... кривой). Для точки *1* величина $F_c + F_н$ определяется отрезком *1—1*.

При вычислении F_c для каждой части магнитопровода применяют кривые размагничивания для данного материала. Для каждого материала приводится ряд кривых, вид которых зависит от предельной величины индукции в стали, получающейся при намагничивании в прямом направлении (см. фиг. 1,4).



Фиг. 3, 28. Кривая размагничивания. Вариант $\Phi_в = f_3\ (F_c + F_н)$.

Следует обратить внимание на то, что для некоторых значений индукции в стали, когда кривая размагничивания материала располагается во втором квадранте, получается отрицательное значение *H*. Отрицательное значение н. с. *Hl* вычитают из величины н. с., необходимой для проведения потока в рабочих зазорах.

Все данные расчета сводят в таблицу, аналогичную таблице 18. Пользуясь кривой размагничивания, изображенной на фигуре 3,28, можно решить следующие задачи.

1. Найти н. с., при которой отпадает якорь. Задаваясь потоком $(\Phi_в)_{от}$, проводят прямую b_2a_2 под углом α_2. Напомним, что в данном случае при построении кривой размагничивания угол α_2 определяется проводимостью рабочего зазора при замкнутом состоянии якоря. Отрезок oa_2 дает требуемое значение $F_{от}$.

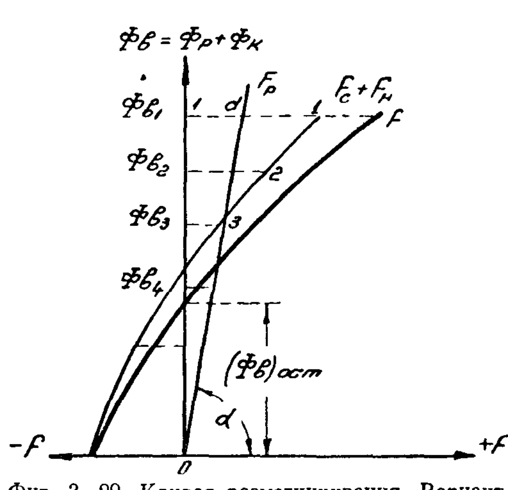
2. Найти величину остаточного потока $(\Phi_в)_{ост}$ в магнитной системе в случае, если якорь не отпадает при $F = 0$. Для этого проводят прямую ob_1 под углом α_2; отрезок b_1c_1 дает значение $(\Phi_в)_{ост}$.

Данные для построения кривой намагничивания

Точки	$\Phi_p + \Phi_k$, *вб*	Деталь	$\Phi_в$, *вб*	Сечение, *см*^{2}	$B = \frac{\Phi}{q}$	H, $\frac{ав}{см}$	F, *ав*	ΣF, *ав*
1	$\Phi_{p1} + \Phi_{k1} = \Phi_{в1}$	1	$\Phi_{в1}$	q_1	B_1	H_1	$H_1 l_1$	
		2	$\Phi_{в1}$	q_2	B_2	H_2	$H_2 l_2$	
		3	$\Phi_{в1}$ $\sigma\Phi_{в1}$	q_3	B_3 B_{31}	H_3 H_{31}	$\frac{H_3 + H_{31}}{2} l_3$	
		4	$\sigma\Phi_{в1}$	q_4	B_4	H_4	$H_4 l_4$	
		5	$\sigma\Phi_{в1}$ $\Phi_{в1}$	q_5	B_{51} B_5	H_{51} H_5	$\frac{H_{51} + H_5}{2} l_5$	
		нераб. зазор 2	$\Phi_{в1}$				$\frac{\Phi_{в1}}{G_2}$	
		3	$\Phi_{в1}$				$\Phi_{в1}/G_3$	
		4	$\sigma\Phi_{в1}$				$\sigma\Phi_{в1}/G_4$	ΣF_1
2	$\Phi_{в2}$	1	$\Phi_{в2}$	q_1	B_{12}	H_{12}	$H_{12} l_1$	

и так далее

3. Найти величину остаточного потока в магнитной системе в случае, когда якорь отпадает. Для этого проводят прямую ob_3 под углом α_1, соответствующим проводимости рабочего зазора при опущенном якоре.

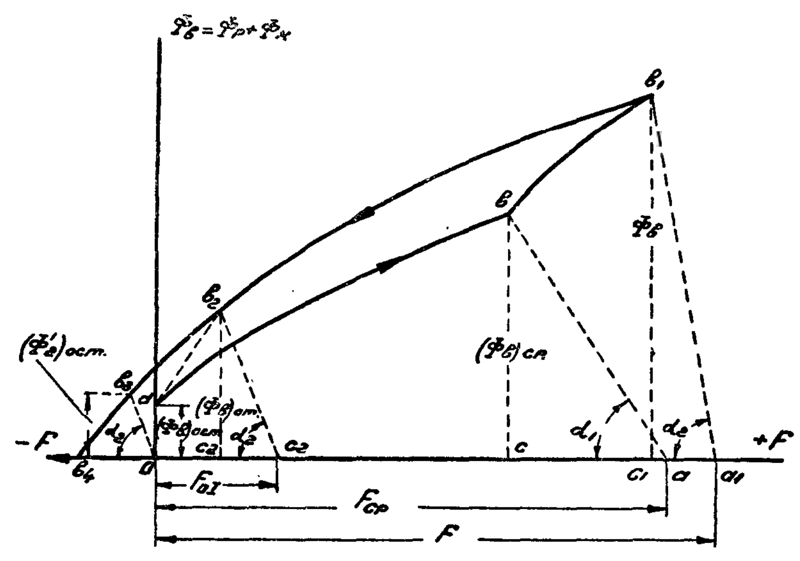


Фиг. 3, 29. Кривая размагничивания. Вариант $\Phi_в = f_4(F)$.

Вариант 2. Строят кривую $(\Phi_р + \Phi_к) = f(F_с + F_н)$ и проводят прямую od под углом α (фиг. 3, 29). Для получения результирующей кривой суммируют для каждой выбранной точки требуемые значения $F_р$ и $F_н + F_с$.

3-11. КРИВЫЕ ПОЛНОГО ЦИКЛА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

На фигуре 3, 30 приведены кривые полного цикла работы электромагнита. В магнитной системе при отключенной катушке и отпущенном якоре имеется остаточный поток $(\Phi_в)_{ост}$. Кривая db соответствует намагничиванию системы при разомкнутом якоре.



Фиг. 3, 30. Кривые полного цикла работы электромагнита.

При увеличении н. с. до значения $F_{ср}$ (отрезок oa) поток достигает величины $(\Phi_в)_{ср}$, при которой начинается движение якоря.

Отрезок $b - b_1$ кривой намагничивания определяется изменением потока при уменьшении зазора и увеличении н. с. катушки до значения F (отрезок oa_1).

Угол α_1 соответствует проводимости $G_p + G_k$ при отпущенном якоре, угол α_2 — при притянутом. При снижении н. с. катушки поток спадает по кривой $b_1 b_2$. Точке b_2 соответствует значение потока $(\Phi_в)_{от}$, при котором якорь отпадает. В дальнейшем, при снижении н. с. до нуля размагничивание происходит по линии $b_2 d$. Если якорь системы не отпадает, спадение потока происходит по кривой $b_1 - b_2 - b_3$.

3-12. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ В МАГНИТОПРОВОДЕ

Пользуясь кривыми намагничивания, можно решить задачу определения значений потоков в разных ветвях замкнутого магнитопровода. Рассмотрим два примера.

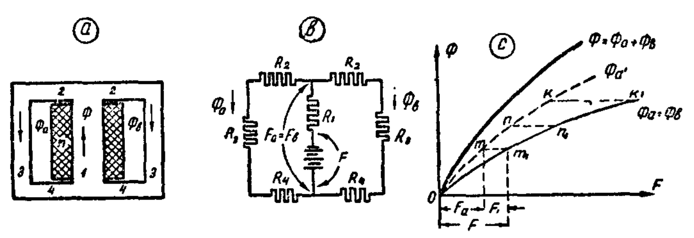
Магнитная система с симметричными ветвями (фиг. 3, 31). Такие системы применяются при исполнении различного рода дросселей

и вспомогательных трансформаторов. Магнитопровод исполняется шихтованным так, что в системе практически отсутствуют воздушные зазоры.

Согласно схеме замещения $F_a = F_в = F - ΦR_1$, или

$$F = ΦR_1 + Φ_a(R_2 + R_3 + R_4).$$

Для решения задачи строят кривую намагничивания. Вначале строят кривую $Φ_a' = f(F_a)$, для чего задаются рядом значений потока $Φ_a$, определяют индукции в частях *2, 3, 4* и по кривой



Фиг. 3, 31. Магнитная система и кривые ее намагничивания.

намагничивания для данного материала находят значения напряженности поля. Тогда

$$F_a = H_2l_2 + H_3l_3 + H_4l_4.$$

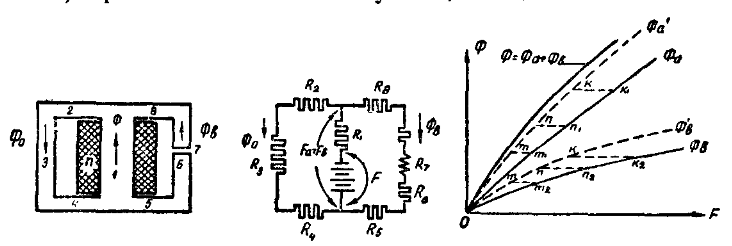
В каждой из полученных точек (m, n, k) добавляют значение

$$F_1 = H_1l_1.$$

Величина H_1 соответствует напряженности поля при индукции $B_1 = \frac{2Φ_1}{q_1}$.

Полученные точки m_1, n_1... соответствуют окончательной кривой для потоков $Φ_a$ и $Φ_в$.

Магнитная система с несимметричными ветвями. Такие системы (фиг. 3,32) применяются в тех случаях, когда желательно иметь



Фиг. 3, 32. Несимметричная магнитная система.

практически постоянное значение потока в одной ветви — $Φ_в$, независящее от изменения н. с. Это достигается введением небольшого воздушного зазора. Решение задачи осуществляется аналогично предыдущему.

Строят кривые $\Phi'_a = f_1(F_a)$; $\Phi'_в = f_2(F_в)$, задаваясь рядом произвольных значений этих потоков.

В точках m, n, k добавляют значение $F_1 = H_1 l$. При нахождении H_1 учитывают, что

$$\Phi'_1 = \Phi'_{a_1} + \Phi_{в_1}; \quad B = \frac{\Phi'_{a1} + \Phi'_{в_1}}{q_1}.$$

Через полученные точки $m_1 n_1 \ldots m_2 n_2$ проводят кривые, которые соответствуют потокам Φ_a и $\Phi_в$. Суммируя ординаты этих потоков, получают точки кривой Φ.

3-13. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ

При расчете магнитной системы в случае наличия в магнитопроводе относительно большого воздушного зазора значение потока в этом зазоре можно вычислить методом последовательных приближений, избегая таким путем применения более громоздкого графического метода.

Сущность метода постепенных приближений заключается в следующем. Вначале определяют значение магнитного потока, не учитывая падения н. с. в стали; далее находят значение индукции в стали и падение н. с. F_c. После этого корректируют полученные предварительные данные. Для пояснения сказанного рассмотрим пример.

Пример. Требуется определить значение потока в рабочем зазоре. Данные системы: $F = 2000$ *ав*; зазор: $q = 2$ *см*², $\delta = 0{,}25$ *см*; магнитопровод: железо Армко, $q = 2$ *см*², $l = 50$ *см*.

Первое приближение.

$$\Phi = FG = 2000 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-8} \frac{2}{0{,}25} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ вебер}.$$

Корректировка: индукция в стали $B = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{вб}{см^2}$. Железо Армко: $H = 2{,}4 \frac{a}{см}$.

$$F_c = 2{,}4 \cdot 50 = 120 \text{ ав}.$$

Таким образом, для потока $\Phi = 2 \cdot 10^{-4}$ требуется 2120 *ав*.

Второе приближение.

Уменьшают значение потока до $\Phi = 1{,}9 \cdot 10^{-4}$ *вб*.

$$B_c = 0{,}95 \cdot 10^{-4}; \quad H_c = 2{,}1; \quad F_c = 2{,}1 \cdot 50 = 105.$$

$$F_в = \frac{\Phi\delta}{\mu_0 q} = \frac{1{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}25}{1{,}25 \cdot 10^{-8} \cdot 2} = 1900.$$

$$F = F_c + F_в = 105 + 1900 = 2005 \text{ ав}.$$

Таким образом, при значении $F = 2000$ *ав* рабочий поток $\Phi \approx 1{,}9 \cdot 10^{-4}$ *вб*.

РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

4-1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Постоянные магниты применяются в разнообразных устройствах и приборах: реле, электроизмерительных приборах, электрических машинах; постоянные магниты применяются также для построения компасов, тахометров, спидометров, магнитных сепараторов и других устройств.

Разнообразие требований, предъявляемых к магнитам в указанных устройствах, обусловило создание различных высококоэрцитивных сплавов, отличающихся по составу, технологическим и магнитным свойствам.

В СССР проведены многочисленные работы по созданию новых сплавов для магнитов и исследованию их свойств. Известны работы А. С. Займовского, Б. Г. Лившица, Я. М. Довгалевского и других.

Различают следующие основные группы сплавов для постоянных магнитов:

1) мартенситные стали;

2) сплавы на основе железо — никель — алюминий, пластически недеформируемые;

3) сплавы пластически деформируемые;

4) сплавы на основе серебро или платина.

1. Мартенситные стали (см. таблицу 19). Лучшие магнитные свойства получаются при структурном состоянии сталей, называемом дисперсионным твердением мартенсита, т. е. металл должен состоять из мартенсита с включением высокодисперсных карбитов:

а) углеродистая сталь (лучшими свойствами обладает сталь марки У-10, применяемая для магнитов малых размеров, неответственного назначения); б) вольфрамовая сталь; в) хромистая сталь, более дешевая и менее дефицитная, чем вольфрамовая; г) кобальтовая сталь.

Таблица 19

Мартенситные стали

Марки	Содержание добавок к железу, %					B_r, $\frac{вб}{см^2}$	H_c, $\frac{а}{см}$	γ, $\frac{г}{см^3}$	ρ, $ом\,\frac{мм^2}{м}$
	C	Cr	W	Co	Mo				
ЕХ3	1,0	3,3	—	—	—	$0{,}95 \cdot 10^{-4}$	48	7,8	0,29
ЕВ6	0,75	0,5	6	—	—	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	44	8,1	0,30
ЕК5	1,0	6	—	6	—	$0{,}8 \cdot 10^{-4}$	72		
ЕК15	1,0	9		15	1,5	$0{,}75 \cdot 10^{-4}$	120		
ЕК30	0,8	5,5	6	30		$0{,}75 \cdot 10^{-4}$	160	8,1	0,27

Перечисленные виды сталей поддаются механической обработке, ковке, обработке резцом. После механической магниты подвергают

термической обработке: нормализации, подогреву, закалке; режим термической обработки должен быть строго выдержан, в противном случае получаются магниты с меньшей магнитной энергией.

Стали обладают склонностью к структурному старению: коэрцитивная сила магнита со временем снижается; во избежание старения во время эксплуатации применяются процессы структурной стабилизации.

Мартенситные стали редко применяются в современных конструкциях реле, так как углеродистые, вольфрамовые и хромистые стали обладают относительно небольшим значением магнитной энергии, а кобальтовые дороги.

2. Сплавы на основе железо—никель—алюминий (см. таблицу 20). В современных конструкциях реле применяют почти исключительно только указанные сплавы вследствие их относительно невысокой стоимости при большом значении относительной величины

Таблица 20

Сплавы на основе Fe — Ni — Al

Марка	Содержание добавок к железу, %					B_r, $\frac{вб}{см^2}$	H_c, $\frac{а}{см}$	γ, $\frac{г}{см^3}$	μ_r при B_0	Способ изготовления
	Ni	Al	Co	Cu	Si					
АН1 (алии 1)	22	11	—	—	—	$0{,}7 \cdot 10^{-4}$	200			Литье
АН2 (ални 2)	24,5	13	—	3,5		$0{,}6 \cdot 10^{-4}$	345	6,9		
АН3 (ални 3)	23,5	15,5	—	4		$0{,}5 \cdot 10^{-4}$	400			
АНК (алниси)	33	13,5	—	—	1	$0{,}4 \cdot 10^{-4}$	600			
АНКО1 алнико 12	18	10	12	6		$0{,}68 \cdot 10^{-4}$	400	7,1		
АНКО2 алнико 15	20	9	15	4		$0{,}75 \cdot 10^{-4}$	480	7,3		
АНКО3 алнико 18	19	10	18	3		$0{,}9 \cdot 10^{-4}$	520			
АНКО4 магнико *	13,5	9	24	3		$12 \cdot 10^{-4}$	400	7,3		
Ални12—23	23	12				$0{,}6 \cdot 10^{-4}$	280	6,7		Металлокерамика
Ални13—25	25	13				$0{,}5 \cdot 10^{-4}$	400	6,6		
Алнико 9—20—15	20	9	15	4		$0{,}65 \cdot 10^{-4}$	465	6,8		Металлокерамика
Магнико	14	6	24	3		$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	360	7,1	6	
Ални—15—24	24	15		4		$0{,}33 \cdot 10^{-4}$	360	5,3		Металлопластика
Алнико 9—20—15	20	9	15			$0{,}44 \cdot 10^{-4}$	400	5,7		

* Примечание. Для магнитов АНКО3 и АНКО4 указанные магнитные свойства относятся к направлению приложенного магнитного поля при термомагнитной обработке.

магнитной энергии. Для получения различных магнитных свойств к сплавам добавляют дополнительно кремний, медь, кобальт.

Указанные сплавы нековки, обладают высокой твердостью и детали из них выполняются поэтому литыми с последующей обработкой требуемых поверхностей шлифовкой.

Готовые изделия перед намагничиванием должны подвергаться термической обработке. По данным ГОСТ 4402—48 предусматриваются следующие режимы: для сплава АН1 — закалка при 1200° в кипящей воде, АН2 — такая же закалка и отпуск при 550°, АН3 — нормализация при 1000°, АНК — при 1200°, АНКО1 — 1250°; АНКО2 — 1300°; АНКО3 — закалка при 1300° в магнитном поле $\left(\text{скорость охлаждения } 5\ \frac{град}{сек} \text{ до } 500°\right)$ и отпуск при 600°.

В последние годы разработаны новые процессы изготовления постоянных магнитов на основе железо — никель — алюминий.

а) Металлокерамический магнит — порошки из соответствующих металлов или лигатур спрессовываются в прессформах под высоким давлением $\left(\text{порядка } 10\ \frac{T}{см^2}\right)$ и затем спекаются при определенной температуре (1100 ÷ 1300°). Металлокерамические магниты обладают по сравнению с литыми большей механической прочностью, спрессованное изделие не требует дополнительной механической обработки. Магнитная энергия таких магнитов меньше, чем у литых (примерно на 10%), что объясняется наличием пор в прессованной детали.

б) Металлопластический магнит — порошок, полученный из литых заготовок сплавов ални или алнико, смешивается с твердым диэлектриком, например с бакелитной смолой, и прессуется под давлением. Полученные детали нагревают до 120° и выдерживают при такой температуре в течение нескольких часов для полимеризации смолы.

Магнитная энергия **прессмагнита** составляет всего 40% магнитной энергии литого по объему и 50% — по весу. Механическая прочность прессмагнитов значительно выше, чем литых. Так, предел прочности на разрыв составляет: у литых 3—6 $\frac{кГ}{мм^2}$, у прессмагнитов — 12 $\frac{кГ}{мм^2}$. Размеры прессмагнитов получаются точными.

3. **Пластически деформируемые сплавы.** Необходимость получения лент и проволоки для выполнения подвесных магнитов электроизмерительных приборов, компасных стрелок, спидометров и других устройств привела к созданию высококоэрцитивных сплавов, допускающих механическую обработку ковкой, волочением, резцовую.

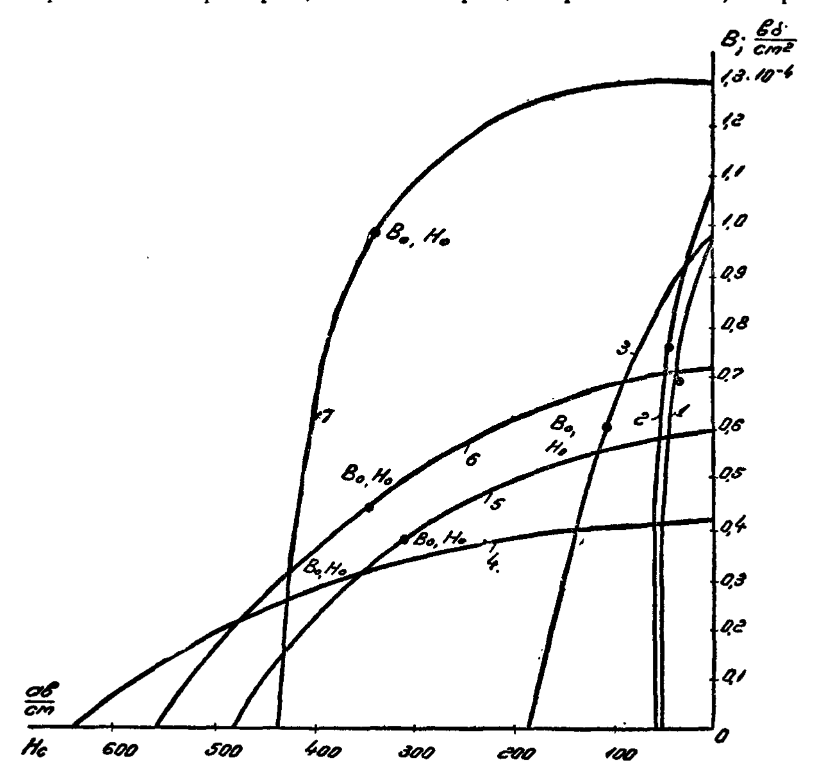
К таким сплавам относятся:

викаллой I — $52Co + 9{,}5V + Fe$; $B_r = 0{,}9 \cdot 10^{-4}\ \frac{вб}{см^2}$; $H_e = 240\ \frac{a}{см}$;

викаллой II — 52Co + 13V + Fe; $B_r = 0{,}9 \cdot 10^{-4}$; $H_c = 320$;
кунифе — сплав Fe — Cu — Ni;
кунико — сплав Cu — Ni — Co.

4. Сплавы на основе — серебро или платина:
силманал — Ag — Mn — Al; $B_r = 0{,}5 \cdot 10^{-4}$; $H_c = 4800$;
сплав Pt — Co; $B_r = 4 \cdot 10^{-4}$; $H_c = 3200$.

Перечисленные сплавы применяются только в малогабаритных измерительных приборах, магнитометрах, вибрационных приборах.



Фиг. 4, 1. Кривые размагничивания магнитнотвердых материалов:
1 — хромистая сталь; 2 — вольфрамовая сталь; 3 — кобальтовая сталь; 4 — альниси; 5 — альни; 6 — альнико; 7 — магнико.

На фигуре 4, 1 изображены кривые размагничивания разных материалов. Приведенные в таблицах 19 и 20 значения для B_r и H_c относятся к максимальным возможным в данном материале.

Практически, учитывая отклонения в технологии изготовления магнита и в процессе намагничивания, получают несколько сниженные (на 10—15%) значения параметров магнита.

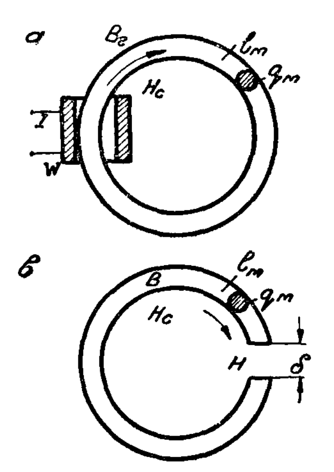
Намагничивание магнита следует производить так, чтобы получить индукцию насыщения B_s. Следует учесть, что магнитная проницаемость материалов для постоянных магнитов низка и

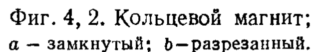
поэтому при намагничивании магнитов необходимо иметь источник с большим значением напряженности поля. Так, для сталей требуется для намагничивания до индукции насыщения значение $H = 450 \div 500 \frac{a}{см}$; для высококоэрцитивных сплавов значение H принимают равным $6H_c$.

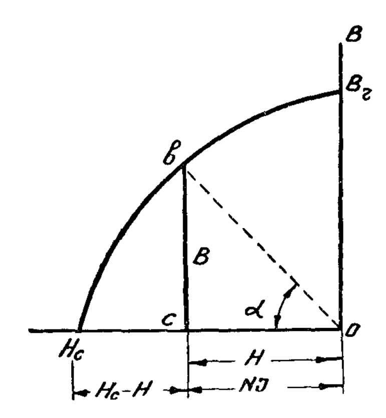
Вопросы крепления и отделки постоянных магнитов рассматриваются в главе I.

4-2. МАГНИТНЫЕ ПОТОКИ ОТДЕЛЬНОГО МАГНИТА

а) Характеристические данные постоянных магнитов. Постоянный магнит представляет собой кусок стали или какого-либо другого твердого сплава, который, будучи намагничен, устойчиво сохраняет запасенную часть магнитной энергии. Назначение постоянных магнитов — служить источником магнитного поля, не меняющимся заметно ни со временем, ни под влиянием таких факторов, как сотрясения, изменения температуры, наличие внешних магнитных полей.




Фиг. 4, 2. Кольцевой магнит; *a* — замкнутый; *b*—разрезанный.



Фиг. 4, 3. Кривая размагничивания.

В релестроении постоянные магниты применяются в качестве элементов поляризованных магнитных систем и магнито-электрических реле или в качестве тормозных магнитов индукционных реле.

Для определения магнитных характеристик готовых магнитов пользуются кривой размагничивания, снятой для материала, из которого изготовлен магнит. Кривая эта снимается для кольца (фиг. 4, 2, *a*), которое намагничивается вначале до индукции насыщения B_s. Характерными точками кривой являются: остаточная индукция в кольце B_r и коэрцитивная сила H_c (фиг. 4-3).

Для использования энергии магнита необходимо изготовить его с воздушным зазором. При разрезании кольца и образовании в нем зазора δ (фиг. 4, 2, *b*) часть н. с. магнита затрачивается на проведение потока в этом зазоре, вследствие чего индукция в магните падает от B_r до B (фиг. 4, 3). Составляющая н. с., затрачиваемая постоянным магнитом на проведение потока в воздушном зазоре, называется свободной н. с. Явление снижения индукции магнита в данном случае аналогично явлению, которое имело бы место, если бы пропустить в катушке, надетой на тороид, размагничивающий ток обратного знака, пропорциональный величине H. Величина этой размагничивающей силы H, а также значение индукции B вычисляются на основании следующих соображений:

1) при замкнутом кольце вся н. с. магнита $F = H_c l_м$, индукция в магните B_r;

2) при разрезании кольца часть н. с. магнита теряется в зазоре δ:

$$F = F_c + F_в,$$

где $F_в$ — составляющая н. с. магнита, приходящаяся на воздушный зазор.

Из предыдущего известно, что

$$F_в \cdot G_в = \Phi_в \quad \text{или} \quad Hl_м \cdot G_в = \Phi_в,$$

где $G_в$ — магнитная проводимость воздушного зазора.

Предположим сначала, что в системе магнита нет потоков рассеяния. В этом случае можно считать, что весь поток магнита проходит через воздушный зазор. Тогда

$$Bq_м = Hl_м G_в;$$

или

$$\frac{B}{H} = \frac{l_м}{q_м} G_в. \qquad (4\text{-}1)$$

С другой стороны, на основании диаграммы, приведенной на фигуре 4, 3,

$$\frac{B}{H} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Таким образом,

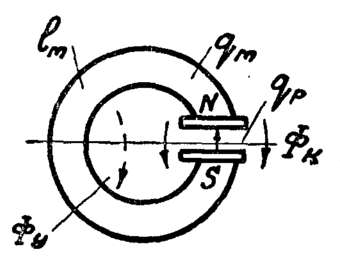
$$\frac{l_м}{q_м} G_в = \operatorname{tg} \alpha, \qquad (4\text{-}2)$$

где $G_в = \mu_0 \frac{q_в}{\delta}$ — магнитная проводимость воздушного зазора.

Имея данные о материале магнита (в виде кривой размагничивания), размеры магнита $l_м$ и $q_м$, размеры зазора $q_в$ и δ можно вычислить, пользуясь (4-2), величину потока в зазоре. Для этого следует провести на диаграмме (фиг. 4, 3) прямую *ob* под углом α. Отрезок *bc* дает величину индукции B магнита. Поток в воздушном зазоре равен $\Phi_в = Bq_м$.

В дальнейших расчетах будут приняты во внимание потоки рассеяния, значением которых в предварительных рассуждениях мы пренебрегли.

б) Учет потока рассеяния магнита. Рассмотрим более общий случай (фиг. 4, 4), когда площадь сечения рабочего зазора $q_p \neq q_м$ не равен площади сечения магнита. Далее будем учитывать потоки: рабочий, в зазоре, Φ_p, краевой $\Phi_к$ и утечки Φ_y.



Фиг. 4, 4. Эскиз магнита с полюсными башмаками.

Тогда коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{\Phi_p + \Phi_к + \Phi_y}{\Phi_p} = \frac{G_p + G_к + G_{yn}}{G_p}. \quad (4\text{-}3)$$

Определение Φ_p производится следующим образом (фиг. 4, 3): проводят прямую ab под углом α, причем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{G_p \sigma}{p} \frac{l_м}{q_м}, \quad (4\text{-}4)$$

где p — коэффициент масштабов B и H.

Полученное значение B характеризует индукцию в **среднем** сечении магнита.

Поток в **среднем** сечении магнита $\Phi_м = Bq_м$;

Поток, рабочий, в зазоре

$$\Phi_p = \frac{Bq_м}{\sigma}; \quad (4\text{-}5)$$

Индукция в рабочем зазоре $B_p = \frac{\Phi_p}{q_p}$.

в) Прямолинейные магниты. Выражение (4-4) дает решение задачи для магнита замкнутой, например подковообразной формы, где проводимости G могут быть вычислены с достаточной для практических целей точностью.

В настоящее время широко применяются постоянные магниты из высококоэрцитивных сплавов: альни, альниси и других, выполняемых, как правило, в виде прямых или немного изогнутых стержней прямоугольного или круглого сечения. Задача вычисления проводимостей в воздухе для этих магнитов весьма трудна, и в таких случаях вопрос об определении значения потока магнита решается иначе, чем было показано выше.

Размагничивающее действие воздушных зазоров, определяемое на фигуре 4,3 отрезком $oc = H$, пропорционально интенсивности намагничивания J:

$$H = NJ,$$

где N — коэффициент размагничивания, зависящий от размеров магнита и данных воздушного зазора. Величина $N = 0$ в образце, имеющем форму замкнутого кольца.

Опытным путем найдены значения N в функции отношения длины стержня к его диаметру: $l_м/d_м$; этими же данными для N

пользуются и при расчете магнитов прямоугольного сечения с площадью $q_м$, определяя диаметр $d_м$ эквивалентного круглого сечения.

$$d_м = \sqrt{\frac{4q_м}{\pi}}. \qquad (4\text{-}6)$$

Из диаграммы фигуры 4,3 имеем

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{B}{H} = \frac{B}{NJ} \cong \frac{4\pi J}{NJ} = \frac{4\pi}{N}(a).$$

Таким образом, зная N (таблица 21) можно определить угол α. Полученное после проведения прямой ab значение B относится к среднему сечению магнита.

Таблица 21

Значения N

$l_м/d_м$	1,35	1,4	1,5	1,6	1,7	1,85	2,0	2,1	2,25	2,4	2,7	3,0	3,4	3,8	4,3	5,0	6,0	7,5	10	16
N	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Для практического пользования таблицей выражение (a) преобразовывается следующим образом:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{10 \cdot 12{,}56}{Np}, \qquad (4\text{-}7)$$

здесь p — коэффициент масштабов.

Фиг. 4, 5. Кривая $B = f\left(\frac{l_м}{d_м}\right)$;

Пример: $l_м/d_м = 2{,}0$; $N = 1{,}4$.

Масштабы:

$$B = 1 \cdot 10^{-4}\,\frac{вб}{см^2} \text{ в } 1\ см;\quad H = 100\,\frac{a}{см} \text{ в } 1\ см;$$

$$P = \frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{8}}{100} = 100;\quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{10 \cdot 12{,}56}{100 \cdot 1{,}4} \cong 0{,}9;$$

$$\alpha = 42^\circ.$$

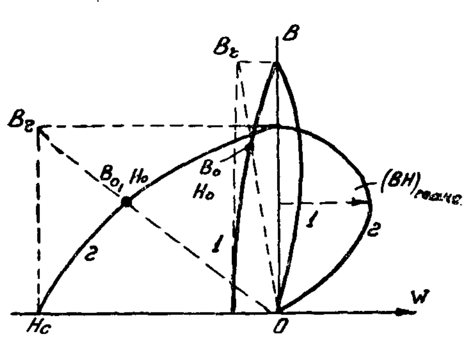
Пользуясь соотношением (4-7), можно построить кривую $B = f\left[\frac{l_м}{d_м}\right]$, удобную для расчета. На фигуре 4, 5 построена примерная кривая для определенного материала.

4-3. СВОБОДНАЯ МАГНИТНАЯ ЭНЕРГИЯ МАГНИТА

Свободная магнитная энергия — это та энергия, которую отдает магнит в воздушных зазорах. При расчете постоянных магнитов, выборе материала и требуемых соотношений размеров магнита стремятся к максимальному использованию материала магнита, сводящемуся к получению максимального значения свободной магнитной энергии.

Магнитная энергия, сосредоточенная в воздушном зазоре, пропорциональна произведению потока в зазоре и н. с.:

$$W = \frac{1}{2} \Phi_в F \ (дж).$$



Фиг. 4, 6. Определение магнитной энергии магнита.

Учитывая, что

$$\Phi_в = Bq_м; \ F = Hl_м,$$

получаем

$$W = \frac{BH}{2} q_м l_м = \frac{BH}{2} V \ (дж), \quad (4\text{-}8)$$

где V — объем магнита в $см^3$.

Материал магнита характеризуется магнитной энергией, отнесенной к единице объема магнита. По кривой размагничивания можно построить кривую $W = f(BH)$ при $V = 1$ (фиг. 4, 6). Крайние точки кривой: 1) $B = 0$; H_c; $W = 0$; 2) $H_c = 0$; B_r; $W = 0$. Имеется точка кривой, соответствующая максимальному значению произведения BH. Соответствующие этому значению величины B и H обозначим через B_0 и H_0.

Значение B_r колеблется для разных материалов в небольших пределах (1 — 2,5), значение H_c — в больших (1 — 20). Поэтому различают две группы материалов:

низкокоэрцитивные — с относительно малым значением H_c, а следовательно, малым значением W (фиг. 4, 6, кривая *1*). Сюда относят хромистые и вольфрамовые стали;

высококоэрцитивные — с большим значением H_c, а следовательно, большим значением W (фиг. 4, 6, кривая *2*).

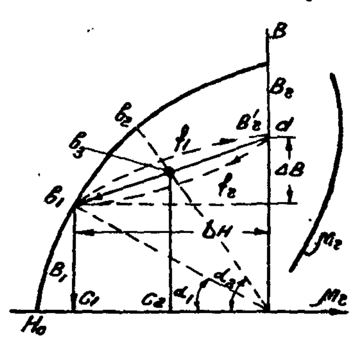
Для определения точек B_0 и H_0, которым соответствует максимальное значение W, применяется практический способ (фиг. 4, 6); проводят прямые, параллельные оси абсцисс и ординат на расстоянии B_r и H_c; точка пересечения диагонали полученного прямоугольника с кривой размагничивания приближенно соответствует значениям B_0 и H_0.

На участке кривой $W = f(BH)$, где получается условие $W_{макс}$, наблюдается незначительное изменение величины W при откло-

нении от значений B_0 и H_0. Поэтому допускается работа магнита с некоторым отступлением от оптимальных значений B_0 и H_0. Оптимальное значение $l_м/d_м$ для прямых магнитов находят по оптимальному углу α (см. 4-7).

4-4. КРИВЫЕ ВОЗВРАТА

В процессе изготовления постоянного магнита, а также в процессе его работы может изменяться значение воздушного зазора. В виде примера рассмотрим процесс изготовления и работы магнитов подковообразной формы: такие магниты намагничиваются с надетыми на них полюсными наконечниками, а затем при сборке магнитной системы между полюсами вставляется якорь (c) из мягкой стали (фиг. 4, 11). Допустим, что до сборки соотношения размеров магнита и зазора таковы, что индукция в среднем сечении магнита равна B (угол α_1 диаграммы фиг. 4-7).



Фиг. 4, 7. Кривые возврата.

При введении якоря воздушный зазор уменьшается, и такому состоянию системы соответствует уже угол α_2, поэтому индукция увеличивается. Однако увеличение это происходит не по кривой размагничивания, а по другой — b_1f_1d, названной кривой возврата. При полном замыкании магнита ($\delta = 0$) остаточная индукция получится равной B'_r. При обратном увеличении зазора индукция изменяется уже по закону кривой df_2b_1. Кривые b_1f_1d и df_2b_1 представляют собой кривые частных циклов намагничивания и размагничивания материала и называются кривыми возврата. Ширина петли, т. е. разность индукции при частном цикле намагничивания и размагничивания, невелика и эту петлю для практических расчетов заменяют прямой.

Отношение $\frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_r$ называется обратимой проницаемостью магнита.

В таблице 20 даны значения μ_r для участка кривой, соответствующего значению индукции B_0. Вблизи этого участка при изменении B значение μ_r меняется незначительно. Поэтому в практических расчетах, в том случае, если работа магнита происходит вблизи точки B_0, пользуются значением μ_r для этой точки.

4-5. СТАРЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ И ИХ СТАБИЛИЗАЦИЯ

Во всяком намагниченном магните с течением времени магнитный поток уменьшается. Это явление, называемое старением магнита, вредно отражается на работе собранного прибора.

Явление старения определяется рядом причин.

а) **Структурное старение.** Материал магнита после закалки или отливки имеет неравномерную структуру, но со временем эта неравномерность переходит в более равновесное — стабильное состояние. При этом в металле исчезают внутренние напряжения. Одновременно уменьшаются значения B_r и H_c.

б) **Механическое старение** происходит вследствие ударов, толчков, вибраций и влияния высоких температур, которые ослабляют поток магнита.

в) **Магнитное старение** определяется влиянием внешних магнитных полей.

Всякий магнит перед установкой его в приборе должен быть подвергнут дополнительному процессу — стабилизации, после которого увеличивается сопротивляемость магнита уменьшению потока.

Структурная стабилизация заключается в дополнительной термической обработке, которая проводится до намагничивания магнита. Так, например, процесс стабилизации магнитных сталей заключается в кипячении закаленного магнита в воде в течение 4 часов. Такое кипячение приводит к некоторому отпуску и к удалению закалочных напряжений, сплавы на основе Fe—Ni—Al не требуют структурной стабилизации.

Механическая стабилизация заключается в том, что намагниченный магнит подвергается перед установкой в приборе ударам, толчкам, вибрациям при условиях, соответствующих режиму работы прибора в установке.

Фиг. 4, 8. Диаграмма, поясняющая действие магнитной стабилизации.

Магнитная стабилизация заключается в том, что намагниченный магнит подвергают действию внешних полей переменного знака, после чего магнит становится более устойчивым к воздействию внешних полей, к температурным и механическим воздействиям. Сущность явления магнитной стабилизации заключается в следующем.

Допустим, что в намагниченном магните точка b_1 соответствует индукции B_1 в среднем сечении магнита (фиг. 4, 8). Под действием внешнего поля, напряженностью $+\Delta H$, точка b_1 переходит по кривой возврата в b_2, при поле $-\Delta H$ — точка b_1 опускается до b_3. Таким образом, индукция B меняется при поле $\pm\Delta H$ на величину ΔB.

Если же магнит предварительно подвергнуть действию поля $\pm\Delta H$, то после этого, под действием такого же поля, значение индукции будет меняться только на величину $\Delta B_1 < \Delta B$. Д

стабилизации магнита его подвергают воздействию постепенно убывающего до нуля переменного поля, напряженность которого должна быть такого же порядка, как и поля, воздействующие на магнит в процессе его работы в приборе. При расчете постоянного магнита учитывается снижение его потока на 10—15%, происходящее в процессе стабилизации.

4-6. ВОПРОСЫ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

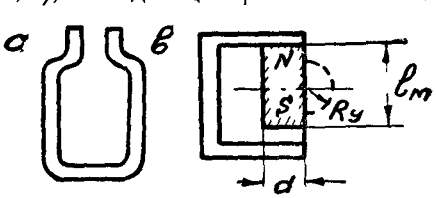
Расчет магнитной цепи с постоянными магнитами сводится к решению двух задач:

1) в заданной системе определить величину потока в рабочем воздушном зазоре;

2) найти размеры постоянного магнита, который создает в рабочем зазоре определенной магнитной системы поток заданной величины.

Более трудной является вторая задача — проектирование магнита, при котором необходимо разрешить следующие вопросы: выбор материала; оптимальное решение; выбор значения коэффициента рассеяния.

Выбор материала зависит от намеченных данных рабочего зазора и конструкции магнитной системы. Рассмотрим для сравнения два материала (*1* и *2* фиг. 4, 6), обладающие разными значениями B_r и H_c. Для материала с меньшим значением H_c лучшие условия получаются при большем значении α, а при большем H_c — с меньшим углом α. При соблюдении этого условия получается решение, близкое к оптимальному, т. е. дающее минимальный вес магнита.



Фиг. 4, 9. Магнит:

а — из низкокоэрцитивного сплава; *b* — из высококоэрцитивного сплава.

Учитывая, что $\operatorname{tg}\alpha = \frac{l_м}{q_м}G_в$, получаем следующие практические выводы:

1) в системах, где длина магнита относительно велика, а рабочий зазор мал, лучше применять низкокоэрцитивные сплавы (материал *1*);

2) в системах с большим зазором лучше применять высококоэрцитивные сплавы (материал *2*).

Для одной и той же магнитной цепи можно создать условия наилучшего использования обеих групп материалов. Так, тормозной магнит счетчика или индукционного реле может быть изготовлен:

1) из низкокоэрцитивного сплава — хромистой или вольфрамовой стали — относительно большой длины (фиг. 4, 9 *а*);

2) из высококоэрцитивного сплава, например альни; в этом случае магнит должен быть коротким (фиг. 4, 9 *b*).

Оптимальное решение. Различают два вида магнитных систем с постоянными магнитами.

1) Без арматуры — к ним относят такие системы, в которых воздушный зазор магнита не меняется при встройке магнита в прибор. В качестве примера можно привести магнит для счетчика (фиг. 4, 9*а*).

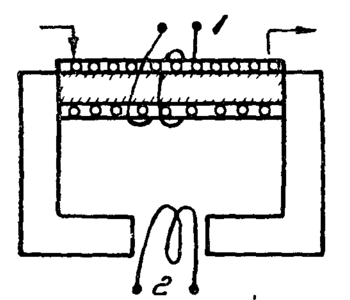
2) С арматурой, в которых воздушный зазор магнита меняется при встройке в прибор. Так, если магнит, приведенный на фигуре 4, 9*б*, намагничивается в собранном виде, то такую систему можно назвать системой **без арматуры.** Если же магнит намагничивается отдельно, а затем его прикрепляют к магнитопроводу, то получается система **с арматурой.**

Оптимальное решение для систем без арматуры находится просто; значительно сложнее решение этой задачи для систем с арматурой. Подробнее этот вопрос рассматривается ниже.

Выбор значения коэффициента рассеяния. В цепях с постоянными магнитами при данной величине н. с. $F = H_c l_м$ значение потока в рабочей части зазора Φ_p находится в прямой зависимости от коэффициента рассеяния σ:

$$\Phi_p = \frac{Bq_м}{\sigma}.$$

В этом отношении цепи с постоянными магнитами значительно отличаются от цепей с магнитномягкими материалами. Объясняется это тем, что магнитнотвердые материалы обладают малым значением магнитной проницаемости μ, и поэтому потоки утечки создают в системе значительные падения магнитных потенциалов.



Фиг. 4, 10. Электромагнитная модель постоянного магнита.

В системе с магнитномягкими материалами при заданной н. с. F величина Φ_p в ненасыщенной системе зависит от коэффициента рассеяния в очень малой степени.

По аналогии с другим источником энергии, например электрической, цепь с постоянным магнитом можно рассматривать как генератор с большим внутренним сопротивлением, а цепь с магнитномягкими материалами — с малым. Поэтому при расчете постоянного магнита весьма важно знать точное значение σ, определение которого представляет значительные трудности. При проектировании постоянного магнита необходимо задаваться значением σ, величина которого колеблется в исполненных системах в пределах 2—5.

Для уточнения вопроса о значении σ исполняют из магнитно мягкого материала модель системы таких же размеров, как и система с постоянным магнитом (фиг. 4, 10).

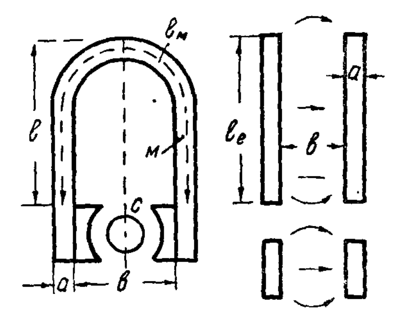
На часть магнитопровода, заменяющую постоянный магнит, насаживается катушка, намагничивающая сила которой выбирается так, чтобы получить необходимое значение Φ_p в рабочей части зазора. Определяют флюксметром значения потока в средней части катушки Φ и в рабочей части зазора.

Тогда

$$\sigma = \Phi/\Phi_p.$$

4-7. КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ

При расчете систем с постоянными магнитами необходимо точно учитывать значение коэффициента рассеяния. Проводимости, рабочие и утечки, определяют различными методами, например методом разбивки поля на ряд простых фигур. Однако для некоторых форм магнитов эти методы не дают требуемой точности. Поэтому приходится весьма часто применять поправочный коэффициент β, на который умножают вычисленное значение σ. В ряде случаев для уточнения величины σ выполняют модели системы (фиг. 4, 10).



Фиг. 4, 11. Подковообразный магнит.

Ниже приводится несколько примеров определения коэффициента рассеяния.

Система с подковообразным магнитом (фиг. 4, 11). Магнит M намагничивается отдельно, чаще всего с пристроенными полюсными башмаками, затем, при встройке магнита в прибор, проводимость между полюсными башмаками увеличивается благодаря наличию сердечника c. Необходимо вычислить проводимость утечки G_{yn}, краевую G_k, проводимость между башмаками G_1 — при отсутствии сердечника и G_p — при наличии его.

Для определения индукции в отдельном магните пользуются значением

$$G_0 = G_1 + G_{yn} + G_k.$$

После встройки магнита в прибор

$$G = G_p \cdot \sigma; \quad \sigma = \frac{G_p + G_{yn} + G_к}{G_p}.$$

Вычисление G_1, G_p и G_k производится обычными методами. Для вычисления G_{yn} подковообразного магнита применяется искусственный способ: подковообразный магнит заменяется двумя параллельными плоскостями такой длины, чтобы проводимость между ними по воздуху была равна проводимости подковообраз-

ного магнита. Длина рабочей части магнита $l_м = 2\left(l_1 - \frac{b}{2} - a\right)$. Эквивалентная длина плоскости

$$l_э = \left(l_1 - \frac{b}{2} - a\right) + 1{,}2\,(a + b). \qquad (4\text{-}9)$$

Поле между плоскостями разбивают на ряд простых фигур, вычисляют значение $G_у$. Учитывая, что разность магнитных потенциалов изменяется равномерно по длине (это положение дает не вполне точное решение), получают $G_{уп} = G_у/2$.

Система с прямолинейным магнитом (фиг. 4, 9 *б*). Проводимость утечки по воздуху между полюсами магнита определяется следующим образом. Площадь потока равна $S = \pi d l_м$. Средняя длина силовой линии упрощенно принимается $l_c = \pi R_у = \frac{\pi l_м}{4}$, тогда

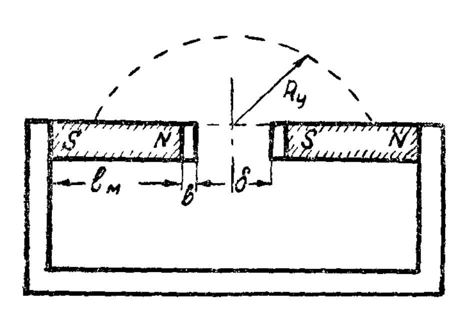
$$G_{уп} = \frac{1}{2}\mu_0 \frac{2\pi d l_м}{\pi l_м} = \mu_0 d.$$

$$\sigma = \frac{G_р + G_к + G_{уп}}{G_р}.$$

Система с двумя прямолинейными магнитами (фиг. 4, 12). Магниты снабжены двумя башмаками из магнитномягкого материала.

$$G_р = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta};$$

$$G_к = \mu_0\left[0{,}26 l + 4\frac{d}{2(\delta/m + 1)}\right] = \mu_0\left[1{,}63\frac{d}{2} + 4\frac{d}{2(\delta/b + 1)}\right].$$



Фиг. 4, 12. Система с двумя прямолинейными последовательно включенными магнитами.

Проводимость $G_у$ определяем из следующих условий: площадь потока $S = \pi d l_м$; средняя длина силовой линии $l_c = \pi\left(\frac{l_м}{2} + b + \frac{\delta}{2}\right)$.

$$G_{уп} = \mu_0 \frac{2 d l_м}{l_м + 2b + \delta}.$$

Учитывая, что н. с. определяется двойной длиной магнита: $F = H 2 l_м$, при определении $G_{уп}$ не нужно делить значение $G_у$ на два. Численный пример:

$\delta = 0{,}515$ *см*; $d = 2{,}56$ *см*; $b = 0{,}2$ *см*; $l_м = 3$ *см*.

$$G_р = \mu_0 \cdot 9{,}9; \quad G_к = \mu_0 \cdot 3{,}5; \quad G_{уп} = \mu_0 \cdot 3{,}94; \qquad \delta = \frac{9{,}9 + 3{,}5 + 3{,}94}{9{,}9} = 1{,}75.$$

Значение коэффициента рассеяния, полученное по данным измерения на модели, $\sigma_1 = 2{,}27$. Таким образом, в расчет надо вводить поправочный коэффициент

$$\beta = \frac{\sigma_1}{\sigma} = \frac{2{,}27}{1{,}75} = 1{,}3.$$

4-8. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Предполагаются заданными: материал магнита, его размеры, размеры всей магнитной цепи. Необходимо определить индукцию в рабочем зазоре.

Ниже рассматривается два случая: а) **система без арматуры** — сюда будем относить случаи, когда магнит намагничивается в собранном с арматурой виде и при встройке в прибор проводимость рабочего зазора не меняется; б) **система с арматурой** — магнит намагничивается отдельно и при встройке в прибор меняется проводимость рабочего зазора.

В дальнейшем пренебрегаем величиной магнитного сопротивления деталей систем из магнитномягких материалов, величиной весьма малой сравнительно с сопротивлением магнита и воздушных путей.

а) Система без арматуры. Определяют значения проводимостей: G_p; $G_к$; $G_{уп}$;

$$\sigma = \frac{G_p + G_к + G_{уп}}{G_p}.$$

Пользуясь диаграммой, данной на фигуре 4, 3, устанавливают значение индукции B в среднем сечении магнита.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l_м}{q_м} \frac{G_p \sigma}{p}, \quad (4\text{-}4)$$

здесь p — коэффициент масштабов B и H.

Тогда

$$B_p = \frac{B q_м}{q_p \sigma}. \quad (4\text{-}10)$$

б) Система с арматурой. Определяют проводимости: 1) G_1 — сех воздушных путей для магнита в том виде, в каком производится его намагничивание. 2) G_p, $G_к$, $G_{уп}$ — для собранной арматурой системы.

Коэффициент рассеяния при наличии арматуры

$$\sigma = \frac{G_p + G_k + G_{уп}}{G_p}.$$

остроения:

1) На диаграмме, приведенной на фигуре 4,7, проводят прямую под углом α_1, причем

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{l_м}{q_м} \frac{G_1}{p}.$$

Отрезок b_1c_1 — величина индукции B_1 магнита при отсутствии арматуры.

2) Проводят кривую возврата b_1d и прямую ob_2 под углом α_2, причем

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{l_м}{q_м} \frac{\sigma \cdot G_p}{p}.$$

Отрезок b_3c_2 — величина индукции B_2 в магните в собранной системе.

$$B_p = \frac{B_2 q_м}{q_p \sigma}.$$

в) **Система с арматурой и прямолинейными магнитами.** Несколько иначе, чем указано в пункте *б*, решается задача для систем с прямолинейными магнитами.

Для примера рассмотрим систему, изображенную на фигуре 4, 12. Магниты намагничиваются отдельно. По отношению $l_м/d_м$ определяют значение угла α_1:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{12{,}56}{1000Np}. \qquad (4\text{-}7)$$

В точке B_1 (фиг. 4, 7) проводят кривую возврата; затем проводят прямую ob_2 под углом α_2, причем

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = 2 \frac{l_м}{q_м} \frac{\sigma \cdot G_p}{p}.$$

Значение $\operatorname{tg} \alpha_2$ увеличено **вдвое**, так как в системе имеется два последовательно включенных постоянных магнита.

4-9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В данном случае требуется установить материал и размеры магнита по заданным параметрам прибора: проводимости рабочего зазора в собранной системе, индукции в рабочей части зазора, B_p.

а) **Выбор материала.** Выбирают такой материал, при котором в заданных условиях работы прибора, получается оптимальное решение, т. е. параметры магнита равны соответственно B_0 и H_0 (или близки к ним). На фигуре 4, 1 показаны характеристики разных материалов и отмечены точки B_0 и H_0. Рассмотрим, пользуясь этими характеристиками, область применения трех наиболее ходких материалов при следующих условиях работы прибора:

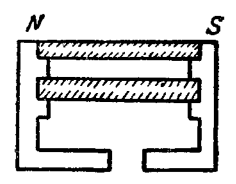
1) относительно малое значение рабочего зазора δ, большое значение B_p. В данном случае получается относительно большое значение G_p, а следовательно и угла α: лучше применить сплав **альни.**

2) Относительно большое значение δ, малое значение B_p: лучше применить сплав **альниси.**

3) относительно большое значение δ, большое значение B_p: лучше применить сплав **магнико**.

Нами указано только общее решение задачи. В каждом отдельном случае необходимо дополнительно учитывать ряд условий: конструктивных, технологических и экономических.

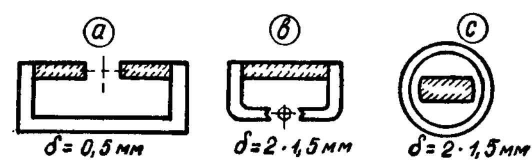
б) Отношение $l_м/q_м$. Как указывалось выше, это отношение принимают из условия получения максимального значения свободной магнитной энергии. Однако такое решение не всегда получается удачным. Так, при необходимости получения весьма больших значений потоков размеры магнита по сечению получаются громоздкими. В таких случаях выгоднее применить систему с параллельными магнитами (фиг. 4, 13). Необходимо располагать магниты на некотором расстоянии друг от друга, так как параллельные магниты размагничивают друг друга.



Фиг. 4, 13. Система с двумя паралельно включенными магнитами.

При необходимости получения высоких значений н. с. F в рабочем зазоре рациональнее применять систему с последовательно включенными магнитами (фиг. 4, 12).

в) Магнитная цепь без арматуры. Заданы: B_p; q_p; δ. Некоторая неопределенность в решении поставленной задачи получается вследствие отсутствия данных о величине коэффициента рассеяния системы. На основании опытных данных задаются значением σ, которое уточняется в проверочном расчете. Иногда приходится проводить несколько вариантов расчета.



Фиг. 4, 14. Формы систем с магнитами.

На фигуре 4, 14 приведены эскизы и данные δ для некоторых видов систем.

При значениях, указанных на эскизе зазоров δ и пределах индукции B от $(0,1 - 0,4)\, 10^4 \frac{вб}{см^2}$, получаются следующие пределы изменения σ:

$$\sigma_a = 1,55 \div 1,87;$$
$$\sigma_b = 2,60 \div 2,88;$$
$$\sigma_c = 1,75 \div 2,06.$$

При увеличении δ увеличивается σ.

Размеры магнита могут быть определены из следующих двух соотношений, в которых индукция в магните и напряженность поля принимаются равными B_0 и H_0:

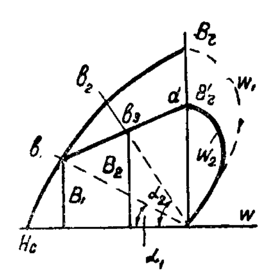
из уравнения потока

$$\Phi_м = B_0 q_м = B_p q_p \sigma; \quad q_м = \frac{B_p q_p \sigma}{B_0}; \tag{4-11}$$

из уравнения н. с.

$$H_0 l_м = \frac{B_p \delta}{\mu_0 l_м}; \quad l_м = \frac{B_p \delta}{\mu_0 H_0}. \qquad (4\text{-}12)$$

г) Магнитная цепь с арматурой. Рассмотрим работу магнита: проводимость воздушных путей без арматуры примем равной G_1, а с арматурой G_2. Тогда, согласно диаграмме, данной на фигуре 4, 15, индукция магнита в собранной системе будет B_2. Изменение проводимости G_2, а следовательно и угла α_2 приводит в этом случае к изменению индукции по кривой возврата $b_1 d$, и максимальное значение получают равным B_r'. Кривая, характеризующая закон изменения магнитной энергии, будет уже не W_1, а W_2 и, таким образом, условия оптимума для данного материала изменяются.



Фиг. 4, 15. Диаграмма работы магнита.

В системах с арматурой условия оптимума в определенной степени зависят от соотношения G_1 и G_2.

Введем понятие об относительном изменении проводимости воздушных путей

$$\eta = \frac{G_2 - G_1}{G_2}. \qquad (4\text{-}13)$$

Учитывая, что углы α_1 и α_2 связаны с проводимостями соотношением

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{G_2}{G_1},$$

получаем из (4-13)

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{1 - \eta} \operatorname{tg} \alpha_1. \qquad (4\text{-}14)$$

Пользуясь введенным понятием, можно найти путем графических построений условия для оптимального соотношения размеров магнита и воздушных зазоров.

Задаваясь определенным значением η строят кривую $BH = f(\operatorname{tg} \alpha_1)$ при $\eta = $ пост.

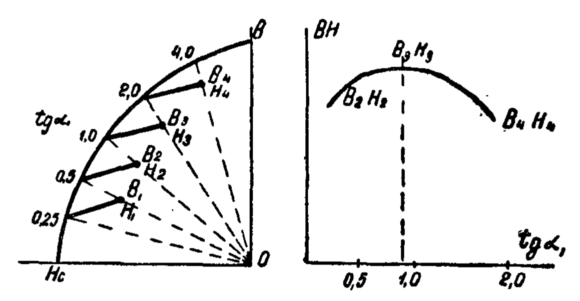
Для примера приведена кривая при $\eta = 0{,}5$ (фиг. 4, 16); задаемся $\operatorname{tg} \alpha_1$, равным 0,25, 0,5, 1,0 и 2,0. Соответственно получаем значения

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{1 - 0{,}5} \operatorname{tg} \alpha_1, \text{ т. е. } 0{,}5,\ 1{,}0;\ 2{,}0;\ 4{,}0.$$

Свободная магнитная энергия в каждом случае пропорциональна BH. Из кривой $BH = f(\operatorname{tg} \alpha_1)$ видно, что оптимальное решение при $\eta = 0{,}5$ получается в случае, когда $\operatorname{tg} \alpha_1 = 1{,}0$.

Таким образом, в случае, когда относительное изменение проводимостей G_2 — при наличии арматуры и G_1 — при отсутствии ее, равно $\eta = 0{,}5$, надо выбрать магнит так, чтобы тангенс начального угла был равен 1.

Если магнит намагничивается в замкнутом магнитопроводе, но без сердечника, например в системе, приведенной на фигуре 4, 11, то отношение $l_м/q_м$ находят из выражения $\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{l_м}{q_м} G_1/p$, где G_1 — проводимость путей потока по воздуху.



Фиг. 4, 16. Кривые для определения оптимального угла.

В случае прямолинейного или слегка изогнутого магнита, намагничиваемого отдельно без сердечника или без остальных частей магнитопровода (фиг. 4, 12), отношение $l_м/d_м$ определяется из выражения (4-7). Для данного материала магнита строится кривая $\operatorname{tg}\alpha_1 = f(\eta)$, из которой определяют значение $\operatorname{tg}\alpha_1$ при заданном значении η (фиг. 4, 17).

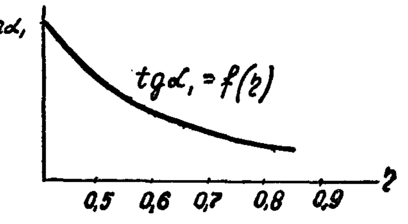
Основные данные и соотношения для расчета. При выбранном материале строится кривая $\operatorname{tg}\alpha_1 = f(\eta)$. Из предыдущего имеем:

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{l_м \cdot G_1}{q_м \cdot p} \quad (4\text{-}4),$$

или

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{12,56}{1000Np} \quad (4\text{-}7);$$

$$\operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{1}{1-\eta}\operatorname{tg}\alpha_1 \,(4\text{-}14);$$



Фиг. 4, 17. Кривая зависимости $\operatorname{tg}\alpha_1$ от относительного изменения проводимости.

$\operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{l_м}{q_м}\mu_0\frac{q_p}{\delta}\frac{\sigma}{p}$ (4-15) для одиночного магнита;

$\operatorname{tg}\alpha_2 = 2\frac{l_м}{q_м}\mu_0\frac{q_p}{\delta}\frac{\sigma}{p}$ (4-16) — для двух последовательно включенных магнитов.

После проведения расчета применяется следующее соотношение для проверки:

$$B_p = \frac{Bq_м}{q_p\sigma}. \quad (4\text{-}10)$$

Ход расчета. Приведенные выше соотношения не позволяют решить задачу определения размеров магнита. Некоторыми величинами приходится поэтому задаваться в предварительном расчете, уточняя их в проверочном. После этого может возникнуть необходимость проведения других вариантов расчета. Количество требуемых вариантов расчета зависит от того, насколько удачно приняты предварительные данные. В ходе расчета заданными являются обычно величины: B_p, q_p, иногда $l_м$.

При расчете задаются значением σ, варьируют значение η, отношение $q_м/q_p$ (изменением размеров полюсных башмаков), а также величиной δ — рабочего воздушного зазора.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ И РЕЛЕ

ГЛАВА 5

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

5-1. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА

Электромагниты применяются в качестве приводного или управляющего устройства в целом ряде механизмов, электрических аппаратов и реле: в подъемных и тормозных электромагнитах, в приводах для включения или отключения коммутационных аппаратов, в приводах задвижек, золотников, в электромагнитных контакторах, в первичных и вторичных реле, в автоматических регуляторах и других.

Электромагнит должен иметь такую форму, при которой получается наиболее рациональное сочетание его конструкции с остальными элементами устройства: контактной системой или исполнительным механизмом; тяговая характеристика электромагнита должна соответствовать требованиям устройства. Задача расчета состоит в том, чтобы найти по заданным условиям работы механизма конструктивные размеры электромагнита и определить его параметры — данные магнитопровода и катушки, а также тяговую характеристику. Расчету электромагнита предшествует построение кинематической схемы устройства, на основании которой строятся характеристики противодействующих сил и моментов:

$$Q_n = Q(\delta) \text{ или } M_n = M(\Theta).$$

Из этих характеристик получают основные расчетные данные для выбора формы и расчета электромагнита.

Процесс расчета имеет следующие стадии:

1) построение кинематической схемы и характеристики исполнительного механизма;

2) выбор формы магнитной системы;

3) предварительный расчет для определения основных размеров и параметров электромагнита;

4) окончательный расчет для уточнения данных предварительного расчета.

При проведении предварительного расчета применяют упрощенные соотношения, некоторыми значениями параметров, например индукцией B в стали, в рабочем зазоре, падением магнитного потенциала в нерабочих зазорах и стали и другими, задаются. После проведения окончательного расчета выявляется рациональность принятой формы электромагнита и принятых параметров.

Если полученное решение не является оптимальным, проводят варианты расчета с измененными параметрами. Число вариантов расчета зависит от того, насколько удачно выбраны параметры для определения габаритов системы.

5-2. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

1) По конструктивному исполнению системы характеризуются перемещением подвижного якоря:

системы с поворотным якорем (фиг. 8, 1), в которых якорь совершает поворотное по отношению к неподвижному полюсу движение;

системы с поперечным движением якоря (фиг. 9, 1), в которых якорь перемещается так, что в своем движении он пересекает среднюю линию, проведенную между неподвижными полюсами;

системы прямоходовые — с поступательным движением якоря (фиг. 10, 1).

Приведенные наименования систем не узаконены стандартами (ГОСТ); применяются и другие наименования: клапанные, с вращающимся якорем, соленоидные и другие.

2) По способу включения катушек и по роду тока различают два вида электромагнитных систем.

Системы $F=пост.$, в этих системах установившееся значение н. с. катушки не меняется по ходу якоря, а значение потока Φ меняется.

К системам $F = пост.$ относятся системы с токовой катушкой постоянного и переменного тока и с катушкой напряжения постоянного тока.

Системы $\psi = пост.$ В системах с катушкой напряжения переменного тока, если не учитывать активной составляющей падения напряжения, весьма малой сравнительно с индуктивной, приложенное напряжение U компенсируется противодействующей э. д. с., определяемой числом потокосцеплений $\psi: U \approx E = \frac{\omega w \Phi}{\sqrt{2}}$. При заданном напряжении U и постоянной частоте $\psi = \Phi w$ остается постоянным по ходу якоря; значение тока I, а следовательно и F меняется по ходу якоря.

5-3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР ФОРМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Ниже приводится ряд условий работы основного устройства, определяющих выбор формы электромагнита.

1. Электромагнитная характеристика должна быть такой, чтобы в любом положении якоря электромагнитная сила или момент были больше силы или момента противодействующих (механических) сил или моментов устройства.

2. Ход или угол поворота якоря. В зависимости от условий работы устройства требуется больший или меньший ход или угол поворота якоря. В быстродействующих реле ход якоря

бывает порядка 0,3 ÷ 1 *мм*, в обыкновенных 2 ÷ 5 *мм*, в контакторах 10 ÷ 20 *мм*, в тормозных магнитах 30 ÷ 150 *мм*.

3. Особенности исполнительного механизма. В реле прямого действия его исполнительный механизм действует непосредственно на устройство автоматики. В реле косвенного действия исполнительным механизмом является контактная система. Существует большое разнообразие форм контактных систем, отличающихся по числу контактов, ходу контактов, по разрывной мощности. Особенности исполнительных механизмов в некоторой степени предопределяют форму магнитных систем: необходимо выполнять эту систему с учетом конструктивного оформления всего устройства в целом.

4. Род тока. Электромагнитные характеристики систем постоянного тока несколько отличны от характеристик систем переменного тока. Поэтому в ряде случаев выбор формы магнитной системы определяется и родом тока.

5. Коэффициент возврата, представляющий собой отношение величины тока или напряжения отпуска якоря к величине тока или напряжения втягивания $\left(k_в = \frac{I_0}{I_н};\ k_в = \frac{U_0}{U_в}\right)$, зависит от степени расхождения характеристик электромагнитной и противодействующего устройства.

Требования, предъявляемые к значению $k_в$, различны: в одних случаях достаточен $k_в = 0{,}1$; в защитных реле требуется $k_в = 0{,}8 \div 0{,}85$; в регуляторах — $k_в$ должен быть порядка 0,99.

6. Время срабатывания системы также определяет выбор формы магнитной системы. В быстродействующих реле время срабатывания должно быть порядка 0,003 ÷ 0,05 *сек*, в обыкновенных — 0,15 *сек*, в замедленных — 0,2 ÷ 20 *сек*. Имеются устройства, где требуется еще большая выдержка времени: порядка нескольких минут.

7. Потребляемая мощность. Значение потребляемой мощности катушек реле и электромагнитов колеблется в исполненных системах от сотых долей ватт до нескольких сот ватт. Специальные требования в отношении малого потребления мощности предъявляются к вторичным реле, включаемым в цепи вторичных обмоток измерительных трансформаторов тока и напряжения. Такое же требование относится и к некоторым видам реле автоматики.

8. Степень уравновешенности подвижных частей системы. При работе устройства в условиях тряски и вибраций, например при установке на кораблях и других подвижных установках, подвижная часть магнитной системы должна быть уравновешена.

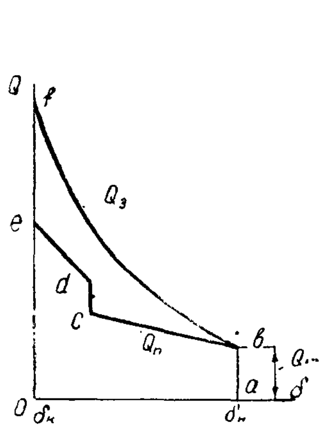
9. Производственные условия. Всякая магнитная система должна быть удобной для производства, части ее должны быть, по возможности, простыми, удобными для изготовления и сборки.

10. Эксплуатационные условия. Устройство должно быть удобно для монтажа, доступно осмотру в эксплуатации, отдельные части должны быть легко сменяемы.

Ниже приводится ряд примеров, показывающих влияние условий работы устройства на выбор формы магнитной системы.

5-4. УСЛОВНАЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Электромагнит всегда проектируется так, чтобы электромагнитные $Q_э$ в процессе движения якоря были больше противодей-



Фиг. 5, 1. Тяговая характеристика электромагнита.

Фиг. 5, 2. Тяговые характеристики электромагнитов с поворотным якорем:
$Q_{э1} - A_1$ — постоянного тока: F = *пост.*
$Q_{э2} - A_2$ — переменного тока: ψ = *пост.*

ствующих сил $Q_п$ (фиг. 5,1). Работа $A_э$, которая может быть получена от электромагнита в процессе движения якоря, выражается площадью $oabfo: A_э = \int_0^{\delta_н} Q_э d\delta$.

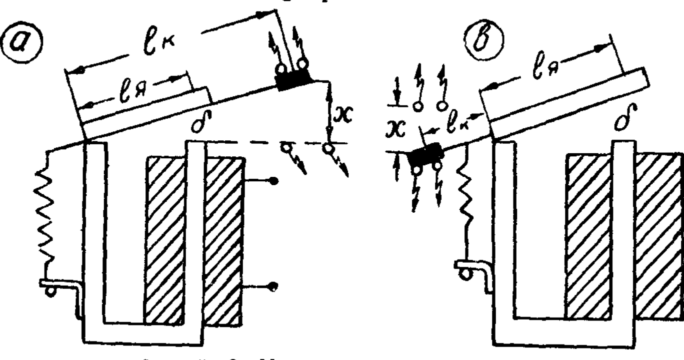
Эта работа получается большей по своему значению, чем требуемая для перемещения якоря (площадь $oabcdeo$). Поэтому электромагниты характеризуют не по полной работоспособности $A_э$, а по условной A, представляющей собой произведение начальной силы $Q_{эн}$ на ход $\delta_н$. Для каждой формы электромагнита существуют оптимальные условия получения минимального размера и веса при определенных величинах $Q_{пн}$ и $\delta_н$. Значение A изменяется по ходу якоря.

Рассмотрим два примера.

1) Электромагнит с поворотным якорем.

На фигуре 5, 2 приведены характеристики системы определенных размеров, но снятые при параллельном включении катушек постоянного и переменного тока.

Соответствующие кривые условной работоспособности A_1 и A_2. Из кривых видно, что системы переменного тока обладают большим значением A_2 при относительно больших значениях $\delta_н$, а системы постоянного тока A_1 при относительно меньших $\delta_н$.

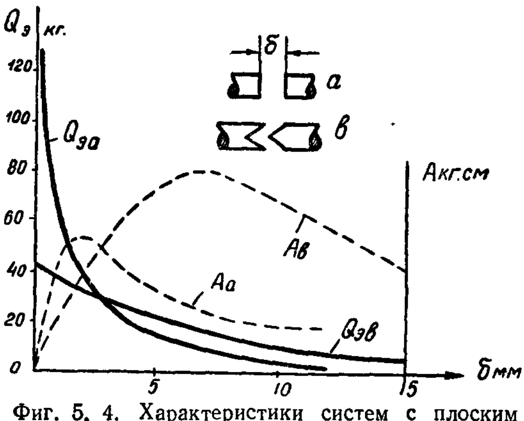


Фиг. 5, 3. Магнитные системы реле:
a — постоянного тока; *b* — переменного тока.

Из полученных данных следуют определенные практические выводы:

а) При построении систем постоянного тока необходимо стремиться к тому, чтобы ход якоря $\delta_н$ был минимальным при заданном ходе X контактов (фиг. 5, 3 *а*). Система должна быть выполнена так, чтобы $l_я$ было меньше $l_к$. Это правило не всегда выполняется. Так, в кодовом реле КДР1 по конструктивным соображениям принято $l_я > l_к$. Однако при исполнении этого же реле с меньшим потреблением энергии — тип КДР2 — принято $l_я < l_к$.

б) При построении систем переменного тока рекомендуется принимать $l_я > l_к$ (фиг. 5, 3 *b*).



Фиг. 5, 4. Характеристики систем с плоским и коническим стопом.

На фигуре 5, 4 приведены характеристики двух электромагнитов прямоходовой системы постоянного тока одинаковых размеров и с одними и теми же данными катушки, но выполненных с разными формами стопов: плоским и коническим. Условная работа электромагнита с коническим стопом больше при больших величинах хода, конечное значение силы и условная работа при малых величинах хода выше у системы с плоским стопом.

5-5. УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД МАТЕРИАЛА

Для сравнительной оценки разных систем в отношении расхода материала при заданных условиях работы электромагнита вводится понятие об удельном расходе материала

$$m = \frac{\text{вес электромагнита}}{\text{условная работа}}.$$

Для каждой формы электромагнита имеются определенные величины сил и хода, при которых вес рационально сконструированного электромагнита получается минимальным.

Для удобства выбора формы электромагнита вводится понятие о конструктивном факторе (к. ф.), представляющем собой отношение

$$\text{к. ф.} = \frac{\sqrt{Q_{эн}}}{\delta_н} = \frac{\sqrt{\text{силы в } кГ.}}{\text{ход в } см.} \qquad (5\text{-}1)$$

Выбор формулы (5-1) определяется на основании следующих соображений:

а) длина электромагнита пропорциональна требуемой величине ход — δ;

б) поперечное сечение стали электромагнита определяется величиной требуемой начальной силы $Q_{эн}$.

Каждой форме электромагнита соответствует определенная зона величин к. ф., при которых эта система выполняется с оптимальными данными по расходу материала.

На основании ряда произведенных расчетов получены практические данные для выбора формы электромагнита, приведенные на таблице 23.

Таблица 23

Значения к. ф. для разных систем

Форма электромагнита	Пределы значений к.ф. для систем $F=$пост.
С поворотным якорем	2,6—26
Прямоходовая с плоским стопом	90—16
» с коническим стопом	16—1,85
» без стопа	ниже 0,2

Пример. 1) Для системы $F=$пост. $Q_н = 16\,кГ$, $\delta_н = 0{,}2\,см$;

$\text{к. ф.} = \frac{\sqrt{16}}{0{,}2} = 20$; лучше применить прямоходовой электромагнит с плоским стопом.

2) Для той же системы при $\delta_н = 0{,}5\,см$

$$\text{к. ф.} = \frac{\sqrt{16}}{0{,}5} = 8;$$ лучше применить конический стоп.

5-6. ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Для расчета электромагнита по заданным размерам магнитной системы пользуются основными соотношениями, принятыми для расчета электрической и магнитной цепи. В случае, когда требуется спроектировать магнитную систему, т. е. определить ее размеры и параметры катушки по заданным условиям работы устройства, необходимо задаваться некоторыми параметрами и величинами: значениями индукции в рабочих зазорах и в стали, коэффициентов рассеяния, отношением длины катушки к толщине намотки и другими.

Принятые значения перечисленных данных определяют собой экономичность конструкции, т. е. создают условия получения модели минимальных размеров и веса. Выбор таких данных основывается на результатах расчета целого ряда электромагнитов. При отсутствии соответствующих данных приходится прорабатывать ряд вариантов с целью получения оптимального решения.

Следует учитывать разницу в условиях решения задачи для систем постоянного и переменного тока. Определяется эта разница тем, что при одном и том же значении потока в рабочем зазоре сила при постоянном токе вдвое больше силы при переменном токе.

Ниже приводятся общие соображения по выбору определенных величин для проектирования магнитной системы электромагнита.

Индукция в рабочем воздушном зазоре. Согласно принятому ранее методу расчета, весь поток в рабочем воздушном зазоре разбивается на два потока: основной, называемый нами рабочим, и краевой $\Phi_в = \Phi_р + \Phi_к$.

Как будет показано в дальнейшем, основная величина силы на якоре определяется потоком $\Phi_р$, поэтому в предварительных расчетах для их упрощения принимают во внимание действие сил, определяемых только основным, рабочим потоком.

В предварительном расчете приходится задаваться значением индукции $B_р = \frac{\Phi_р}{q}$. Оптимальное значение $B_р$ колеблется в больших пределах: от $0{,}06 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-4} \frac{вб}{см^2}$. Выбор $B_р$ определяется соотношением между заданной тяговой силой $Q_н$ при отпущенном якоре и величиной хода: с увеличением силы необходимо принимать большее значение индукции.

Опытные и расчетные данные оптимальных значений $B_р$ удобно систематизировать в функции к. ф.

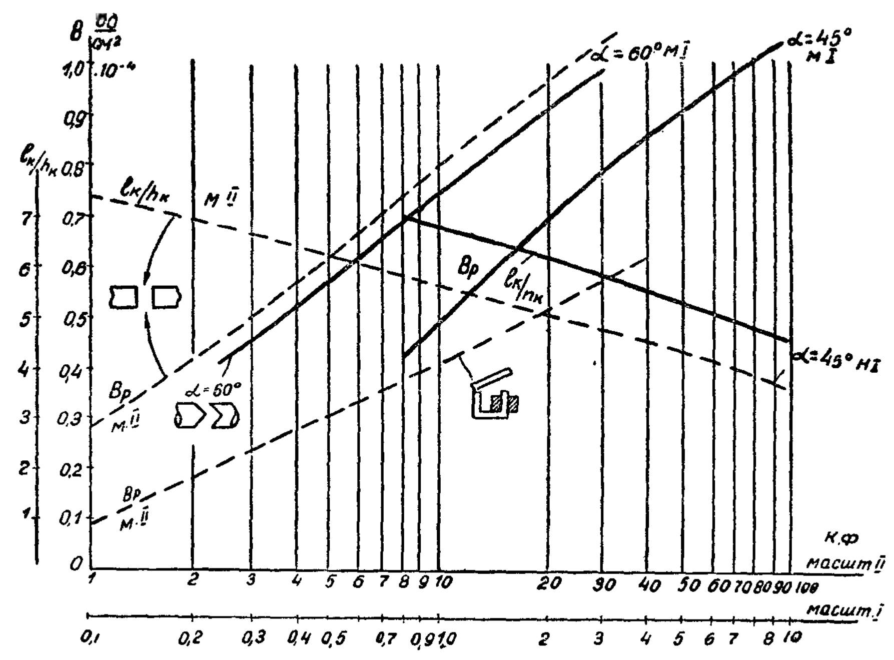
На фигуре 5,5 приведены кривые $B_р = f$(к. ф.) для некоторых видов электромагнитов постоянного тока. Эти же кривые применимы и для систем переменного тока, при этом вводится понятие об эквивалентном значении конструктивного фактора:

$$к. ф. = \frac{\sqrt{2Q_н}}{\delta}. \qquad (5\text{-}2)$$

Это эквивалентное значение получается из условия: при одном и том же максимальном значении индукции B сила на якоре при постоянном токе вдвое больше силы при переменном.

Отношение длины катушки к толщине намотки.

Площадь сечения меди катушки $q_к = l_к h_к$ принимают в зависимости от требуемого значения н. с. F. Значение $q_к$ может быть



Фиг. 5, 5. Кривые зависимости $B_р = f$ (к. ф.) для магнитных систем: масштаб I – сплошные линии; масштаб II – пунктирные.

получено при разных отношениях $\frac{l_к}{h_к}$. При изменении этого отношения получаются разные условия в отношении расхода меди и стали:

1) увеличение $\frac{l_к}{h_к}$ приводит к уменьшению расхода меди, так как при этом уменьшается объем меди и увеличивается поверхность охлаждения катушки;

2) увеличение $\frac{l_к}{h_к}$ приводит к увеличению расхода стали, так как при этом увеличивается длина магнитопровода.

Минимальный вес всей конструкции достигается для различных видов электромагнитов и условий их работы разными путями.

Практикой установлено следующее: при относительно большом ходе якоря и малом значении силы принимается бо́льшее значе-

ние $\frac{l_к}{h_к}$, при увеличении силы и уменьшении хода — это отношение уменьшается.

Таким образом, и отношение $\frac{l_к}{h_к}$ можно фиксировать в функции значения к. ф. Значение $\frac{l_к}{h_к}$ колеблется в практически выполненных конструкциях в пределах $1 \div 8$.

Падение магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах

Значение $F_с + F_н$ составляет определенный процент от общего значения F — н. с. катушки. Рассматривая систему при разомкнутом положении системы — якорь отпущен — можно отметить следующее:

а) большое удельное значение $F_н$ приводит к увеличению расхода меди, малое значение $F_н$, получающееся при увеличенных размерах стали в местах перехода от якоря к ярму, связано с увеличением расхода стали;

б) такое же положение имеет место при рассмотрении $F_с$. В рационально исполненных конструкциях

$$F_н = 0{,}05 \div 0{,}15\,F, \quad F_с = 0{,}1 \div 0{,}2\,F.$$

Следовательно,

$$F_с + F_н = 0{,}15 \div 0{,}35\,F. \tag{5-3}$$

Коэффициент рассеяния. Для определения размеров магнитопровода требуются данные о величине полного потока в системе $\Phi = \sigma \Phi_р$. В предварительном расчете задаются значением σ, которое представляет собой отношение

$$\sigma = \frac{G_р + G_к + G_{ун}}{G_р}.$$

Значение σ колеблется в пределах $1{,}3 \div 2{,}5$; меньшие значения получаются в электромагнитах с малым ходом якоря, большие — с большим.

5-7. УСТАНОВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРИНЯТЫХ ДАННЫХ

Системы постоянного тока. Как указывалось в параграфе 5-4, условная работоспособность электромагнита выражается как произведение величины начальной силы на ход якоря:

$$A = Q_{эн}\,\delta.$$

Для данной формы электромагнита значение A зависит от величины принятых при предварительном расчете данных: $B_с$ — индукции в стали и $B_р$ — индукции в рабочем зазоре. Таким обра-

зом, выбор значения этих данных определяет собой экономичность конструкции, т. е. получение максимальной работоспособности при минимальном расходе стали и меди.

Проверку соответствия принятых данных оптимальным проводят, пользуясь кривой намагничивания системы.

На фигуре 5, 6 кривая K соответствует потерям н. с. в стали и нерабочих зазорах, отрезок oa — полной н. с. катушки, oc — н. с. $F_c + F_н$ при данном потоке $\Phi_р$, $ac - oc$, приходящейся на рабочий зазор.

Угол α соответствует проводимости рабочего зазора $\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_p}{p}$ (p—отношение масштабов).

Можно показать, что площадь Δabc пропорциональна работе A, совершаемой при перемещении якоря на пути δ:

$$\text{площадь } \Delta abc = \frac{1}{2} F_p \Phi_p, \quad (5\text{-}4)$$

с, другой стороны,

$$A = Q_э\delta = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p^2}{q}\delta. \quad (5\text{-}5)$$

Далее,

$$\Phi_p \frac{\delta}{\mu_0 q} = F_p. \quad (5\text{-}6)$$

Фиг. 5, 6. Диаграмма для определения оптимальной проводимости рабочего зазора.

Следовательно,

$$A = c\Phi_p F_p. \quad (5\text{-}7)$$

Сопоставляя (5-4) и (5-7), видим, что площадь $\Delta abc = c_1 A$.

Рассмотрим влияние принятых значений индукций в стали и в воздухе $B_р$ на величину площади Δabc.

1. Характер кривой K, определяющей собой потери $F_c + F_н$, зависит от принятого значения B_c. При уменьшении B_c получается кривая K_1 (пунктирная); площадь треугольника, характеризующего A электромагнита, будет уже иной (см. ab_1c_1), размеры магнитопровода увеличиваются.

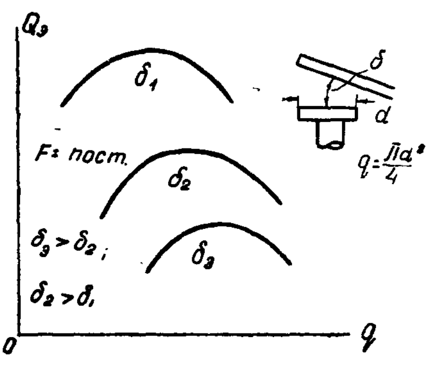
2. Изменение индукции $B_р$ связано с изменением сечения рабочего потока, т. е. с изменением проводимости G_p.

При уменьшении $B_р$ необходимо увеличивать G_p. Пользуясь кривой K_1, мы устанавливаем, что увеличение G_p приводит к изменению площади треугольника, так как новому углу α_2 соответствует треугольник ab_2c_2. Варьируя значение G_p, а следовательно, и B_p, можно получить максимальное значение работоспособности A электромагнита при заданной н. с. системы (oa).

Практически для определения оптимального значения G_p, а следовательно, и B_p, поступают следующим образом. Откладывают на оси абсцисс отрезок, соответствующий принятой н. с.

катушки, проводят ряд прямых ab, ab_2, ab_3 ..., определяют значения площадей треугольников abc, ab_2c_2 и останавливаются на выборе проводимости, соответствующей максимальному значению площади треугольника.

Изменение G_p весьма удобно осуществляется в магнитных системах постоянного тока с поворотным якорем: для этого достаточно изменить диаметр полюсного наконечника, укрепляемого на сердечнике. При этом согласно формуле $Q_э = 4{,}06 \cdot 10^8 \cdot B^2 q$ при заданной величине $Q_э$ изменяется значение индукции B_p.

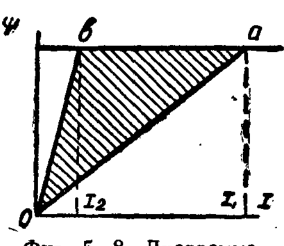


Фиг. 5, 7. Кривые зависимости силы от площади полюса.

В системах переменного тока, а также соленоидных системах для изменения G_p приходится изменять сечение сердечника. Для иллюстрации влияния принятого значения G_p, а следовательно B_p, приводим кривые, показывающие изменения величины силы, действующей на якорь при изменении сечения полюсного наконечника. Все кривые (фиг. 5, 7) сняты при 2000 ампервитках катушки.

Каждой величине зазора δ соответствует оптимальное значение размеров полюсного наконечника.

Системы переменного тока



Фиг. 5, 8. Диаграмма работы системы ψ-пост.

В магнитных системах механическая работа перемещения якоря от положения $\delta_н$ до $\delta_к$ совершается за счет магнитной энергии системы W.

В системах с постоянным числом потокосцеплений ψ эта работа определяется площадью треугольника oab (фиг. 5, 8):

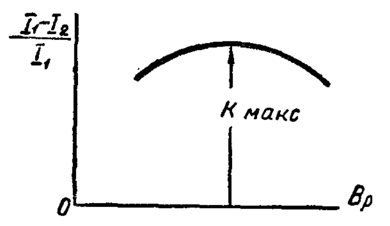
$$\text{площадь } oab = 0{,}5\psi (I_1 - I_2),$$

где I_1 — значение тока при зазоре $\delta_н$; I_2 — значение тока при зазоре $\delta_к$.

При увеличении разности этих токов увеличивается и работоспособность электромагнита, причем эта разность в определенной степени зависит от принятого значения индукции B_p при разомкнутом якоре.

При построении зависимости $\frac{I_1 - I_2}{I_1} = f(B_p)$ получается кривая, в которой имеется ясно выраженное максимальное значение $k_{макс} = \frac{I_1 - I_2}{I_1}$ (фиг. 5, 9). В рационально выполненных конструкциях значение $k_{макс}$ бывает порядка 0,9.

Практически для определения оптимального значения поступают следующим образом. Подсчитывают значение k для разных величин индукции B_p, строят кривую $k = f(B_p)$ и принимают значение B_p, соответствующее $k_{макс}$. При накоплении ряда опытных и расчетных данных строят кривые $B_p = f(Q_{эн}, \delta_н)$, и в этом случае несколько громоздкая работа по построению кривой k отпадает.



Фиг. 5, 9. Кривая $k = f(B_p)$.

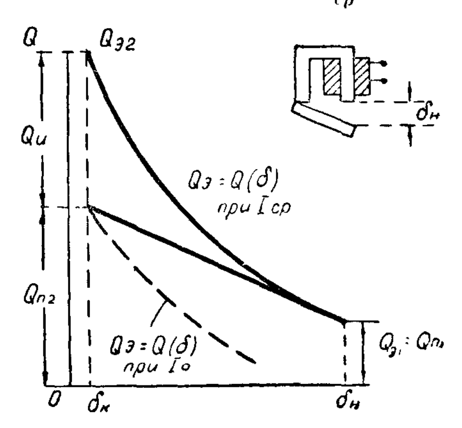
5-8. КОЭФФИЦИЕНТ ВОЗВРАТА

Коэффициентом возврата называют отношение величины, при которой происходит отпуск якоря, к величине, при которой происходит его втягивание.

Коэффициент возврата по току равен $k_в = \frac{I_{от}}{I_{ср}}$.

Коэффициент возврата по напряжению равен $k_в = \frac{U_{от}}{U_{ср}}$.

Значение коэффициента возврата всегда меньше единицы и колеблется для разных исполнений электромагнитов в пределах от $k_в = 0{,}1$ до $k_в = 0{,}99$. Для вычисления $k_в$ необходимо иметь характеристики противодействующих механических сил и тяговой электромагнитной. Для примера рассмотрим магнитную систему с поворотным якорем. Характеристики $Q_э = Q(\delta)$ и $Q_п = Q(\delta)$ приведены на фигуре 5, 10. При начальном зазоре $\delta_н$ имеем следующие значения сил на якоре:



Фиг. 5, 10. Диаграммы для определения коэффициента возврата.

1) противодействующие: вес якоря и начальное натяжение пружины;

2) электромагнитная: при каком-то токе срабатывания $I_{ср}$ создается сила такой величины, что она превышает $Q_{п1}$.

Обычно принимают, что началу движения якоря соответствует равенство $Q_{э1} = Q_{п1}$.

При конечном зазоре δ_k имеют место следующие значения сил на якоре:

1) механические противодействующие силы: добавляется сила растяжения пружины при ходе от $\delta_н$ до δ_k

$$Q_{п2} = Q_в + Q_{п1} + \Delta Q_п.$$

2) электромагнитные: электромагнитная сила при том же токе I_{cp} и зазоре δ_k будет большей и равна $Q_{э2}$.

Якорь реле будет отходить обратно в том случае, когда ток катушки снизится до значения $I_{от}$, при котором электромагнитная сила $Q_{э3}$ становится меньше силы $Q_{п2}$.

Вычислим значение коэффициента возврата по току: $k_в = \frac{I_{от}}{I_{cp}}$. При зазоре $\delta_к$ имеем: $Q_{э2} = k_1 I^2_{cp}$; $Q_{э3} = k_1 I^2_{от}$; отсюда

$$I_{cp} = \sqrt{\frac{Q_{э2}}{k_1}}; \quad I_{от} = \sqrt{\frac{Q_{э3}}{k_1}} = \sqrt{\frac{Q_{п2}}{k_1}}.$$

Тогда

$$k_в = \sqrt{\frac{Q_{п2}}{Q_{э2}}} = \sqrt{\frac{Q_в + Q_{п1} + \Delta Q_п}{Q_в + Q_{п1} + \Delta Q_п + Q_и}}, \qquad (5\text{-}8)$$

где $Q_и = Q_{э2} - Q_{п2}$ — избыточная сила на электромагните в конечном притянутом положении якоря.

Преобразуем (5-8), добавляя в числитель $+Q_и$ и $-Q_и$,

$$k_в = \sqrt{\frac{Q_{п2} + Q_и - Q_и}{Q_{п2} + Q_и}} = \sqrt{1 - \frac{Q_и}{Q_{п2} + Q_и}}. \qquad (5\text{-}9)$$

Таким образом, значение $k_в$ тем выше, чем меньше значение $Q_и$ и чем больше $Q_{п2}$.

На основании (5-9) устанавливают следующее положение: высокий коэффициент возврата получается при условии совпадения электромагнитной и механической характеристик электромагнита. Практически такое совпадение на всей части характеристики неосуществимо. Однако можно выполнить реле так, чтобы имело место совпадение на определенном участке характеристик; тогда якорь реле должен иметь движение только на этом участке.

Следует отметить, что (5-9) дает приближенное значение. Дело в том, что при выводе этого выражения значение k_1 принято одинаковым для сил $Q_{э2}$ и $Q_{э3}$. Практически же коэффициент этот неодинаков для обеих сил, что объясняется наличием коэрцитивной силы в стали магнитопровода.

Для получения точного значения $k_в$ необходимо строить кривые намагничивания и размагничивания системы.

Вычисляют значения $\Phi_{к\,ср}$ и $\Phi_{к\,от}$ — потоков в рабочем зазоре, при которых происходит срабатывание якоря (втягивание) и отпускание его. Пользуясь кривой полного цикла работы электромагнита (фиг. 3, 30), определяют значение коэффициента возврата

$$k_в = \frac{F_{от}}{F_{ср}} = \frac{oc_2}{oa}.$$

Изменение коэффициента возврата в определенной системе осуществляется изменением конечного зазора $\delta_к$ или постановкой пружины с другим углом жесткости j.

ГЛАВА 6

ВЫЧИСЛЕНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ

6-1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В электромагнитных системах механическая работа перемещения якоря создается за счет изменения подведенной из сети магнитной энергии. Выражения для сил и моментов на якоре определяются соответственно:

$$Q = \frac{dW}{d\delta}; \qquad (6\text{-}1)$$

$$M = \frac{dW}{d\theta}. \qquad (6\text{-}2)$$

Здесь δ и θ — параметры, определяющие величину хода или угла поворота якоря.

В зависимости от характера силы, создаваемой на якоре, различают:

Силу притяжения поверхностей двух тел из магнитного материала, когда силы продольного тяжения силовых трубок, проходящих между этими поверхностями, вызывают притяжение подвижной части к неподвижной, например якоря к сердечнику.

Соленоидную силу, наблюдающуюся в прямоходовых соленоидных системах, где на якоре создается сила, определяемая взаимодействием потока утечки от якоря к наружному ярму с током, протекающим в катушке. В соленоидных системах перемещение якоря, при наличии стопа в системе, определяется обеими видами сил: притяжения якоря к стопу и соленоидной.

6-2. ВЛИЯНИЕ КРАЕВОГО ПОТОКА

Значения сил и моментов электромагнитов пропорциональны величине $\frac{dG_в}{d\delta}$ или $\frac{dG_в}{d\theta}$, где $G_в$ — проводимость воздушных рабочих зазоров: $G_в = G_р + G_к$.

На основании ряда подсчетов установлено, что с изменением хода якоря проводимость краевого потока $G_к$ менее резко изменяется с изменением хода, чем рабочая проводимость $G_р$, т. е.

$$\frac{dG_к}{d\delta} < \frac{dG_р}{d\delta}.$$

Это значит, что сила на якоре, создаваемая краевым потоком, незначительна по сравнению с силой, создаваемой рабочим потоком. Рассмотрим для примера поле между якорем и сердечником цилиндрической формы.

Примем $r = 2$ *см*; $\delta = 0,2$ *см*.

$$G_в = G_р + G_к = G_р + (G_{12} + G_{13}) = 78,5 \cdot 10^{-8} + 13,8 \cdot 10^{-8} = 92,3 \cdot 10^{-8} \text{ вб/ав}.$$

$$\frac{dG_р}{d\delta} = -393 \cdot 10^{-8} \text{ вб/ав}; \quad \frac{dG_к}{d\delta} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ вб/ав}.$$

$$\frac{dG_в}{d\delta} = -389 \cdot 10^{-8} \text{ вб/ав}.$$

Таким образом, в данном примере получаем следующее: величина краевого потока равна 17,5% рабочего, производная проводимости краевого потока равна лишь 1% производной проводимости рабочего. Для некоторых форм магнитных систем эта цифра повышается до 5—10%.

6-3. ФОРМУЛА МАКСВЕЛЛА

Сила притяжения поверхностей двух тел из магнитного материала, между которыми протекает поток Φ, выражается по Максвеллу

$$Q = \frac{\Phi^2}{8\pi q} \text{ дин}, \qquad (6\text{-}3)$$

где Φ — в *мкс*, q — *см*^{2}.

Формула Максвелла справедлива для случая однородного поля. При рассмотрении поля между якорем и сердечником электромагнитной системы можно приближенно считать поле рабочего потока однородным. Это поле и учитывается в (6-3), а краевое поле относят к потокам рассеяния.

Формула Максвелла дает в ряде случаев только приближенное решение с ошибкой порядка 5—15%, поэтому она применяется, как правило, в предварительных расчетах систем с поворотным якорем и прямоходовых. При проведении точных расчетов формула применима для вычисления сил в конечном положении якоря, когда зазор δ невелик.

Применяя формулу, необходимо учитывать род тока.

Система постоянного тока. Преобразуя (6-3), получаем

$$Q = 4,06 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q} \text{ кГ}, \qquad (6\text{-}4)$$

где Φ — в веберах, q — *см*^{2}. Часто пользуются соотношением

$$Q = 4,06 \cdot 10^8 B_р^2 q \text{ кГ}, \qquad (6\text{-}5)$$

где $B_р$ — $\frac{вб}{см^2}$.

Система переменного тока. Рассмотрим систему, где поток меняется по закону

$$\Phi_t = \Phi \sin \omega t.$$

В таких системах учитывается мгновенное значение силы Q_t и среднее значение силы за период Q.

$$Q_t = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_t^2}{q} = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2 \sin^2 \omega t}{q}; \qquad (6\text{-}6)$$

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T Qt \cdot dt = \frac{1}{T} 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q}\int_0^T \sin^2 \omega t \, dt,$$

или

$$Q = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p^2}{q} \ кГ; \qquad (6\text{-}7)$$

$$Q = 2{,}03 \cdot 10^8 B_p^2 q \ кГ. \qquad (6\text{-}8)$$

При расчете систем переменного тока с катушкой напряжения $\psi = пост.$ значение Φ_p определяют из значения Φ — потока системы.

Если

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}U}{\omega w}; \quad \sigma = \frac{G_p + G_k + G_{yc}}{G_p}; \quad \Phi_p = \frac{\Phi}{\sigma},$$

где G_{yc} — приведенное по числу потокосцеплений значение проводимости утечки, тогда

$$Q = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{\sigma^2 q}. \qquad (6\text{-}9)$$

6-4. ВЫРАЖЕНИЕ СИЛЫ В ФУНКЦИИ ПРОИЗВОДНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Формула Максвелла не всегда удобна для расчетов, например при вычислении моментов в системах с поперечным движением якоря. Кроме того, эта формула в ряде случаев не дает точных результатов расчета.

Более точные результаты получаются при пользовании формулой, вывод которой произведен на основе учета баланса магнитной энергии системы (см. 6-1 и 6-2). Преобразования этих формул приводят к виду

$$Q = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\delta} \quad \frac{дж}{см}; \qquad (6\text{-}10)$$

$$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} \quad \frac{дж}{рад}. \qquad (6\text{-}11)$$

Значение $L = \frac{w^2}{R}$, где $R = R_в + R_c$.

При наличии воздушных зазоров в системе $R_c \ll R_в$. Поэтому при практических расчетах электромагнитов принимают

$$L = \frac{w^2}{R_в} = w^2 G \ генри, \qquad (6\text{-}12)$$

где G — проводимость воздушных путей потоков в системе в $\frac{вб}{а}$.
Из (6-10), (6-11) и (6-12) имеем

$$Q = \frac{1}{2} I^2 w^2 \frac{dG}{d\delta} \frac{дж}{см} = 5{,}1 I^2 w^2 \frac{dG}{d\delta}\ кГ. \quad (6\text{-}13)$$

$$M = 5{,}1 I^2 w^2 \frac{dG}{d\theta}\ кГ\,см. \quad (6\text{-}14)$$

При пользовании соотношениями (6-13) и (6-14) необходимо учитывать особенности систем постоянного и переменного тока.

Системы постоянного тока. Произведение Iw представляют собой часть н. с. катушки, затрачиваемой в рабочем зазоре, F_p. Таким образом, соотношения (6-13) и (6-14) получают следующий вид:

$$Q = 5{,}1 F_p^2 \frac{dG}{d\delta}\ кГ. \quad (6\text{-}15)$$

$$M = 5{,}1 F_p^2 \frac{dG}{d\theta}\ кГ. \quad (6\text{-}16)$$

Задачу определения F_p решают графически, пользуясь кривой намагничивания системы: $\Phi_в = f(F_c + F_н)$ (фиг. 3,26). В точке a, соответствующей полному значению F катушки, проводят прямую ab, под углом α, причем $\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_в}{p}$ (p — коэффициент, учитывающий масштабы Φ и F). Отрезок ca на оси абсцисс определяет значение F_p. Это значение меняется по ходу якоря, когда меняется проводимость воздушного зазора $G_в$. При расчете электромагнита принимают во внимание наиболее неблагоприятные условия, т. е. минимально возможное значение н. с. катушки. Этому условию соответствует случай включения катушки на пониженное напряжение сети, например $U = 0{,}85 U_н$, причем предполагается, что сопротивление катушки соответствует максимальному значению превышения температуры

$$F_{мин} = \frac{0{,}85 U_н w}{r_{гор}}. \quad (6\text{-}17)$$

Системы переменного тока. $F = пост.$ Для системы с токовой катушкой действительны соотношения (6-13) и (6-14), но при этом следует учитывать, что значения Q и M получаются средними за период, F — эффективное значение н. с.

Системы переменного тока. $\psi = пост.$ В таких системах принимают

$$U \cong E = \frac{\omega \Phi w}{\sqrt{2}}. \quad (6\text{-}18)$$

и

$$I = \frac{U}{\omega L}. \quad (6\text{-}19)$$

Из (6-13), (6-14), (6-18) и (6-19)

$$Q = 0{,}5 \frac{U^2}{\omega^2 L^2} \frac{dL}{d\delta} = 0{,}5 \frac{U^2}{\omega^2 w^2 G^2} \frac{dG}{d\delta} \ \text{дж/см},$$

или, учитывая $G_p = G/\sigma$, имеем:

$$Q = 5{,}1 \frac{U^2}{\omega^2 w^2 \sigma G_p^2} \frac{dG_p}{d\delta} \text{кГ}. \qquad (6\text{-}20)$$

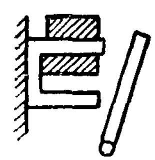
$$M = 5{,}1 \frac{U^2}{\omega^2 w^2 \sigma G_p^2} \frac{dG_p}{d\theta} \ \text{кГсм}. \qquad (6\text{-}21)$$

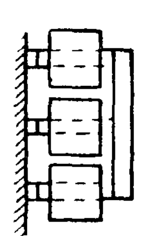
При вычислении Q и M следует учитывать $U = 0{,}85 U_н$.

6-5. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Существуют электромагниты, снабженные тремя системами, которые действуют на общий якорь. Катушки этих систем включаются на три фазы сети переменного тока (фиг. 6,1). Мгновенное значение силы на якоре с учетом действия одной катушки:

$$Q_{ti} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\delta}. \qquad (6\text{-}10)$$





Фиг. 6, 1. Строенная магнитная система переменного тока.

Примем $i = I \sin \omega t$. В трехфазной симметричной системе, при условии, что потоки отдельных фаз системы не влияют друг на друга:

$$Q = 0{,}5 \left[I_1^2 \sin^2 \omega t + I_2^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) + \right.$$
$$\left. + I_3^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{4}{3}\pi \right) \right] \frac{dL}{d\delta}.$$

После проведения соответствующих преобразований получаем

$$Q = \frac{3}{4} I^2 \frac{dL}{d\delta} \ \text{дж/см}. \qquad (6\text{-}22)$$

Таким образом, при наличии тройной системы с катушками, включенными в симметричной трехфазной сети, общее значение средней силы на якоре в 1,5 раза больше средней силы одной магнитной системы.

Отметим, что сила Q строенной системы остается постоянной во времени и, следовательно, отсутствуют явления вибрации, получающиеся в однофазной системе.

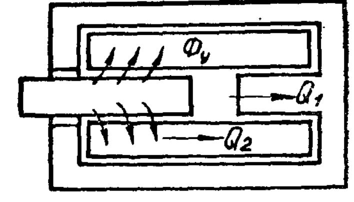
6-6. СОЛЕНОИДНАЯ СИЛА

В прямоходовых системах сила на якоре, определяемая изменением магнитной энергии системы по ходу якоря, рассматривается для удобства расчета состоящей из двух сил (фиг. 6, 2):

а) Q_1 — силы притяжения двух поверхностей, определяемой потоком $\Phi_в$;

б) Q_2 — соленоидной силы, определяемой взаимодействием потока утечки Φ_y от якоря к наружному кожуху с током, протекающим в катушке.

Вычисление значения Q_2.



Фиг. 6, 2. Силы на якоре прямоходовой системы.

$$Q_2 = \frac{dW_y}{dx} = \frac{1}{2} I \frac{d\psi_y}{dx} \ дж/см. \qquad (6\text{-}23)$$

Число потокосцеплений потока утечки ψ_y:

$$\psi_y = \frac{w}{l_к} x B_y yx = \frac{w}{l_к} B_y y x^2, \qquad (6\text{-}24)$$

где B_y — индукция потока, выходящего нормально к оси якоря, y — периметр якоря. Из (6-23) и (6-24)

$$Q = \frac{wxy}{l_к} I B_y.$$

Учитывая, что напряженность поля катушки

$$H = \frac{Iw}{l_к}\ ; \ \Phi_y = B_y yx,$$

имеем

$$Q_2 = 10{,}2 H \Phi_y \ кГ. \qquad (6\text{-}25)$$

Для систем $\psi = пост.$ следует учитывать, что Q_2 — среднее значение силы за период, Φ_y — амплитудное значение потока. В этом случае

$$Q_2 = \frac{10{,}2}{\sqrt{2}} H \Phi_y. \qquad (6\text{-}26)$$

При вычислении соленоидной силы необходимо принимать во внимание смещение нейтрали a—b, которое по мере увеличения x и уменьшения δ перемещается в сторону рабочего зазора, что приводит к уменьшению Φ_y, а следовательно и Q_2. При значениях $\delta < 0{,}1 l_к$ величину Q_2 практически можно не учитывать.

6-7. ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КАТУШКИ В СИСТЕМЕ

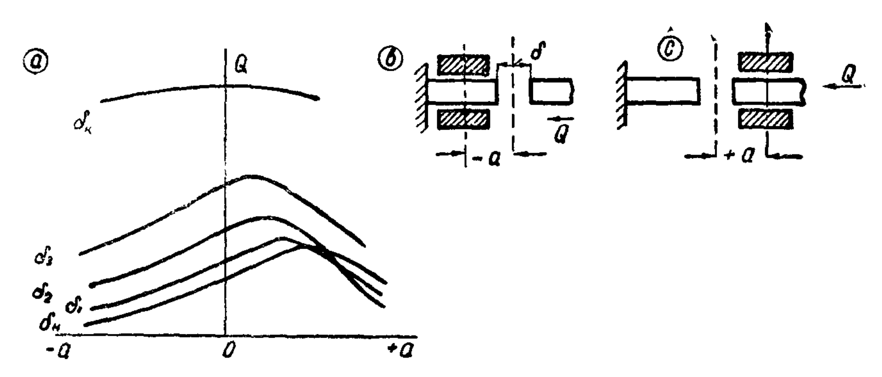
Величина тяговой силы электромагнита в значительной степени зависит от расположения катушки в магнитной системе. Возможны следующие варианты расположения катушки при отпущенном якоре:

а) средняя линия катушки совпадает со средней линией начального воздушного зазора между подвижным якорем и неподвижным сердечником;

б) средняя линия смещена влево (фиг. 6,3 *в*);

в) средняя линия смещена вправо (фиг. 6,3 *с*).

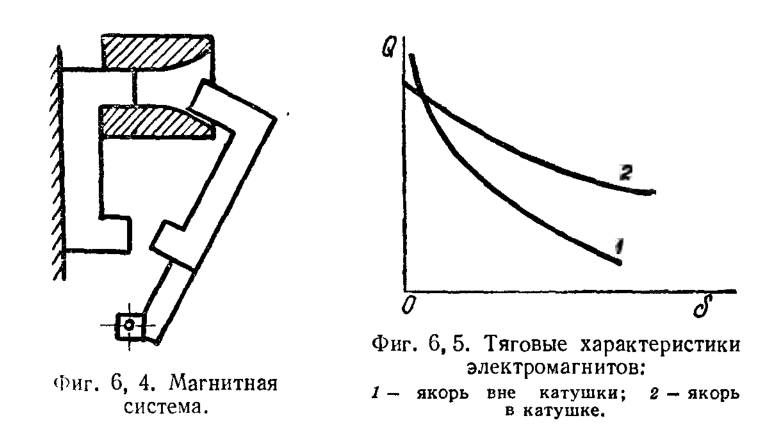
А. П. Назаренко, при исследовании магнитных систем контакторов, установил влияние расположения катушки на величину тяговой силы электромагнитов с поворотным якорем. На фигуре 6, 3 приведены полученные А. П. Назаренко кривые, из которых



Фиг. 6, 3. Кривые зависимости силы на якоре от расположения катушки.

видно, что наиболее благоприятные условия в отношении создания начальной силы на якоре, получаются при положительном значении *a*.

А. П. Назаренко предложена соответствующая конструкция для электромагнитов, контакторов и реле переменного тока



Фиг. 6, 4. Магнитная система.

Фиг. 6, 5. Тяговые характеристики электромагнитов:
1 — якорь вне катушки; 2 — якорь в катушке.

(фиг. 6,4). По сравнению с ранее применявшейся для контакторов переменного тока магнитной системой Е-образного типа с утопленным расположением катушки, А. П. Назаренко получил значительную экономию меди и стали.

ГЛАВА 7

РАСЧЕТ ЭКРАНА ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ЯКОРЯ

7-1. ВИБРАЦИИ ЯКОРЯ

При включении катушек электромагнитов на напряжение переменного тока получающееся на якоре мгновенное значение силы Q_t не является величиной постоянной, а изменяется вместе с изменением по времени величины потока в системе.

При наличии потока $\Phi_t = \Phi \sin \omega t$ мгновенное значение силы получается равным

$$Q_t = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_t^2}{q} = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q} \sin^2 \omega t. \qquad (7\text{-}1)$$

Заменяя в (7-1) $\sin^2 \omega t = 0{,}5\,(1 - \cos 2\omega t)$,
имеем

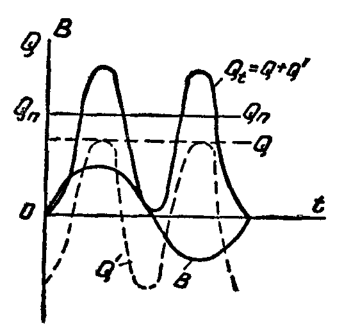
$$Q_t = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q} - 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q} \cos 2\omega t. \qquad (7\text{-}2)$$

Таким образом, можно считать, что мгновенное значение силы состоит как бы из двух частей:

1) постоянной составляющей $Q = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q}$; (7-3)

2) переменной составляющей $Q' = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q} \cos 2\omega t$. (7-4)

Полное значение силы Q_t меняется с двойной частотой от нуля (при $\omega t = 0$) до двойного значения (при $\omega t = 0{,}5\pi$) (фиг. 7, 1).



Фиг. 7, 1. Кривые $Q = f\,(t)$ электромагнита переменного тока.

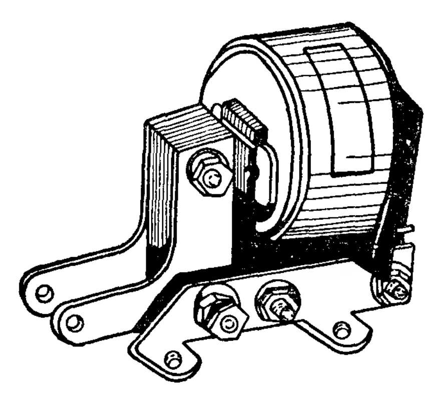
Если противодействующая — механическая сила — в электромагните равна Q_n, то в моменты, когда $Q_n > Q_t$, якорь начинает отходить от сердечника и снова возвращается в момент, когда $Q_t > Q_n$.

Таким образом, якорь в течение одного периода стремится отойти от сердечника и два раза снова притянуться к нему, т. е. при переменном токе с частотой 50 *гц* якорь имеет 100 колебаний в секунду. Эти колебания недопустимы, так как они создают условия, приводящие к износу магнитной системы и к подгоранию контактов.

Кроме того, вибрации якоря вызывают шум и гудение, неприятно действующие на обслуживающий персонал. Поэтому в электромагнитах переменного тока применяют, как правило, специальные меры к устранению вибраций.

7-2. СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ВИБРАЦИЙ

Для устранения вибраций необходимо, чтобы при переменном токе электромагнитная сила притяжения якоря не падала ниже силы Q_n противодействующего устройства. Для этого магнитную систему исполняют так, чтобы притяжение якоря происходило от действия двух потоков, существующих одновременно, но сдвинутых в пространстве и во времени. Тогда при переходе значения одного потока через нуль другой имеет какую-то определенную величину, благодаря чему значение электромагнитной силы не снижается до нуля.


Фиг. 7,2. Магнитопровод с экраном.

Для устранения вибраций в практике применяют два способа.

1. Магнитная система реле состоит из двух отдельных магнитопроводов; катушка одного магнитопровода подключается непосредственно к сети, а второго — через емкость. В этом случае поток во втором магнитопроводе сдвинут по фазе по отношению к потоку первого магнитопровода.

2. В сердечнике или в якоре магнитной системы у рабочего зазора ставится короткозамкнутое кольцо — экран (фиг. 7, 2). Экран охватывает только часть сечения сердечника или якоря и поток, пронизывающий эту экранированную часть, отстает по фазе от потока, пронизывающего неэкранированную часть.

В релейной практике применяется, как правило, второй способ устранения вибраций. Первый способ, дающий более громоздкое конструктивное решение, применяется редко.

Следует отметить, что в электромагнитах с тремя катушками, включенными в цепь трехфазного тока, явление вибрации не имеет места. Объясняется это тем, что общая сила притяжения трех потоков, сдвинутых по фазе на 120°, пропорциональна Φ^2 и имеет поэтому постоянную величину, не зависящую от времени.

7-3. ПУЛЬСАЦИИ СИЛЫ

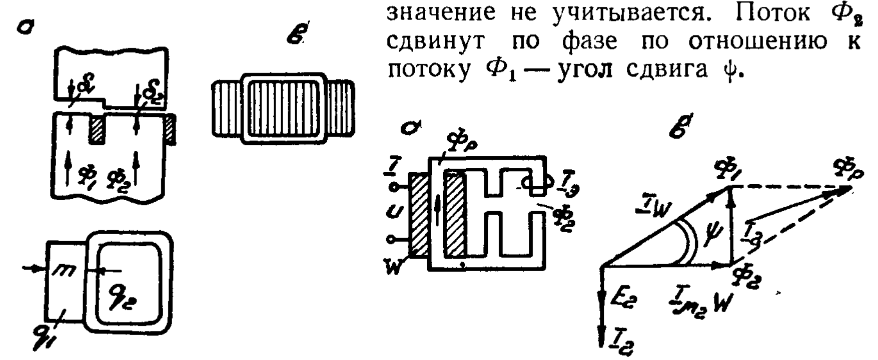
Ниже рассматриваются системы с экраном. На фигуре 7, 3 представлена та часть магнитопровода, где происходит стык между якорем и сердечником. В сердечнике установлен экран в виде короткозамкнутого витка из латуни или меди.

Примем следующие обозначения:

а) неэкранированная часть — поток Φ_1, площадь сечения q_1, зазор δ_1;

б) экранированная часть — соответственно, Φ_2, q_2, δ_2.

Упрощенная векторная диаграмма без учета углов потерь для потоков Φ_1 и Φ_2 приведена на фигуре 7, 4. Намагничивающая сила катушки магнитной системы $F = Iw$ определяется как геометрическая сумма $F_2 = I_{\mu_2} w$ для потока Φ_2 и $F_2^1 = I_2$, где I_2 ток экрана. Индуктивное сопротивление экрана весьма невелико и его значение не учитывается. Поток Φ_2 сдвинут по фазе по отношению к потоку Φ_1 — угол сдвига ψ.



Фиг. 7, 3. Варианты расположения экранов в магнитопроводе.

Фиг. 7, 4. Схема замещения и векторная диаграмма.

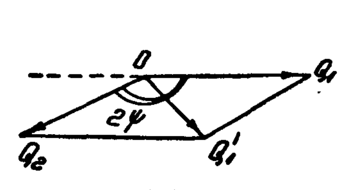
При наличии потоков Φ_1 и Φ_2 мгновенные значения силы на якоре, согласно (7-2):

$$Q_{t_1} = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi_1^2}{q_1} - 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi_1^2}{q_1} \cos 2\omega t. \qquad (7\text{-}5)$$

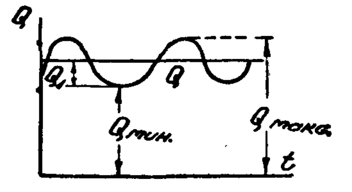
$$Q_{t_2} = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi_2^2}{q_2} - 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi_2^2}{q_2} \cos (2\omega t - 2\psi). \qquad (7\text{-}6)$$

Или, с учетом обозначений (7-3):

$$Q_{t1} = Q_1 - Q_1 \cos 2\omega t \ (7\text{-}7); \quad Q_{t2} = Q_2 - Q_2 \cos (2\omega t - 2\psi). \qquad (7\text{-}8)$$



Фиг. 7, 5. Векторная диаграмма.



Фиг. 7, 6. Силы на якоре системы с экраном.

Амплитудное значение суммарной переменной составляющей может быть определено из векторной диаграммы (фиг. 7, 5):

$$Q' = \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2 + 2Q_1Q_2 \cos 2\psi}. \qquad (7\text{-}9)$$

Суммарное значение постоянной составляющей $Q = Q_1 + Q_2$. Представляет интерес рассмотрение двух сил (фиг. 7, 6): максимальной $Q_{t макс} = Q + Q'$; минимальной $Q_{t мин} = Q - Q'$.

Пульсация силы, т. е. отношение амплитудного значения переменной составляющей Q' к постоянной

$$p = \frac{Q'}{Q}. \qquad (7\text{-}10)$$

Пульсации в системе отсутствуют при $Q' = 0$. Установить условия $Q' = 0$ можно пользуясь диаграммой, приведенной на фигуре 7, 5. Амплитудное значение $Q' = 0$ получается при наличии двух условий: 1) $Q_1 = Q_2$; 2) $2\psi = \pi$.

Таким образом, для устранения пульсации сил в электромагните необходимо выполнить следующие условия:

1) угол сдвига между потоками ψ должен быть равен 90°;

2) постоянные составляющие сил должны быть равны

$$Q_1 = Q_2. \qquad (7\text{-}11)$$

Как будет показано ниже, в системах с экраном выполнить первое условие практически невозможно. В существующих системах значение $\psi = 50 \div 80°$. При несоблюдении первого условия минимальное значение пульсации получается при наличии второго условия.

Ниже рассматриваются две задачи: расчет системы с экраном и проектирование экрана.

7-4. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ С ЭКРАНОМ

Задачей расчета является вычисление минимального значения электромагнитной силы $Q_{t\,мин}$ на якоре в протянутом его положении. Предполагаются известными все данные электромагнита и экрана: рабочее напряжение катушки $U_н$, число витков катушки w, коэффициент рассеяния магнитной системы при притянутом якоре — σ, размеры полюса q_1 и q_2 (фиг. 7, 3), омическое сопротивление экрана. Основные соотношения для расчета можно получить из векторных диаграмм.

Распределение потоков. Рассмотрим схему замещения магнитной системы с расщепленным полюсом (фиг. 7, 4 *a*). Система состоит из двух частей: дроссельной катушки с воздушным зазором δ_1 и трансформатора с зазором δ_2 и вторичной короткозамкнутой обмоткой (экраном). Общий поток сердечника $\Phi_р$ разделяется у расщепленного полюса на две части: Φ_1 и Φ_2.

При построении упрощенной диаграммы (фиг. 7, 4 *b*):

1) не учитываются потери н. с. катушки в стали магнитопровода;

2) углы потерь для потоков Φ_1 и Φ_2 принимаются равными, поэтому при построении диаграммы эти углы не учитываются;

3) не учитывается реактивное сопротивление экрана, которое во много раз меньше омического — по экспериментальным данным $r_э/x_э$ получается порядка 10.

Значение потоков Φ_1 и Φ_2 определяется н. с. катушки системы

$$F = Iw = I_{\mu_2}w + I_э.$$

Обозначим $G_1 = \mu_0 \frac{q_1}{\delta_1}$; $G_2 = \mu_0 \frac{q_2}{\delta_2}$ — магнитные проводимости полюса у неэкранированной и экранированной части его.

Тогда $\Phi_1 = \sqrt{2}\, IwG_1$; $\Phi_2 \sqrt{2}\, I_{\mu_2}wG_2 = \sqrt{2}\, IwG_2 \cos\psi$;

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{G_1}{G_2 \cos\psi} = \frac{q_1\delta_2}{\delta_1 q_2 \cos\psi}.$$

Обозначив

$$\alpha = q_1/q_2; \qquad (7\text{-}11)$$

$$\beta = \delta_1/\delta_2, \qquad (7\text{-}12)$$

получаем

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\alpha}{\beta \cos\psi}. \qquad (7\text{-}13)$$

В обычных исполнениях электромагнитов $\delta_1 = \delta_2$; тогда

$$\Phi_1/\Phi_2 = \frac{\alpha}{\cos\psi} = c. \qquad (7\text{-}14)$$

Значение угла ψ определяется следующим образом: из фигуры 7,4*b*

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{I_э}{I_{\mu_2} w} = \frac{E_э}{r_э I_{\mu_2}w}. \qquad (7\text{-}15)$$

При числе витков экрана, равном 1,

$$E_э = \frac{\omega}{\sqrt{2}}\Phi_2; \quad \Phi_2 = \sqrt{2}\, I_{\mu_2}wG_2.$$

Подставляя значения $E_э$ и Φ_2 в (7-15), получаем

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\omega G_2}{r_э}. \qquad (7\text{-}16)$$

Определив отношение потоков Φ_1 и Φ_2 (7-14) и значение угла ψ, можно найти величины этих потоков в функции результирующего потока Φ_p, определяемого н. с. катушки.

Из диаграммы, приведенной на фигуре 7,4*b*, имеем

$$\Phi_p^2 = \Phi_1^2 + \Phi_2^2 - 2\Phi_1\Phi_2 \cos(\pi - \psi) = \Phi_1^2 + \Phi_2^2 + 2\Phi_1\Phi_2 \cos\psi;$$

учитывая (7-14), получаем

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_p}{\sqrt{1 + c^2 + 2c\cos\psi}}; \qquad (7\text{-}17)$$

$$\Phi_1 = c\Phi_2. \qquad (7\text{-}18)$$

Силы на якоре. Минимальное значение электромагнитной силы на якоре в притянутом его положении, $Q_{t\,мин}$ определяется как

сумма постоянных составляющих сил от потоков Φ_1 и Φ_2 и переменной составляющей.

$$Q_{t мин} = Q_1 + Q_2 - Q'.$$

С учетом (7-9) получаем

$$Q_{t мин} = Q_1 + Q_2 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2 + 2Q_1Q_2 \cos 2\psi}. \qquad (7\text{-}19)$$

Значение $Q_{t мин}$ должно быть больше $Q_{пк}$ — значения противодействующих механических сил на якоре в притянутом его положении. В противном случае будет наблюдаться явление вибрации якоря.

Расчет следует проводить с учетом падения напряжения в сети, т. е. при $U = 0{,}85\,U_н$.

Потери в экране. Активные потери в экране $P = I_э^2 r_э$. Учитывая

$$I_э = \frac{E_э}{r_э} = \frac{\omega \Phi_2}{\sqrt{2} r_э},$$

получаем:

$$P = \frac{\omega^2 \Phi_2^2}{2r_э}. \qquad (7\text{-}20)$$

При вычислении активных потерь и превышения температуры экрана следует учитывать условие $U = U_н$.

Значение тока в рабочей катушке системы определяется построением полной векторной диаграммы с учетом падения н. с. в стали магнитопровода и потерь на гистерезис и вихревые токи (см. главу 3).

7-5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ЭКРАНОМ

Задачей проектирования является установление размеров q_1 и q_2 расщепленного полюса, а также размеров экрана с тем, чтобы минимальное значение электромагнитной силы на якоре в притянутом его положении, $Q_{t мин}$, было больше $Q_{пк}$ — конечного значения противодействующей механической силы. При этом принимают определенное значение коэффициента запаса $к_н$.

$$Q_{t мин} = к_н Q_{пк}.$$

При выводе основных соотношений для расчета принимают ря*д* допущений, которые приводят к тому, что расчетные значени*я* сил получаются меньшими, чем действительные. Поэтому значени*е* $к_н$ принимают небольшим, порядка 1, I.

Общий расчет и проектирование электромагнита проводится и*з* условия получения требуемой электромагнитной силы при задан*-*ных значениях начальной силы противодействующих устройст*в* $Q_{пн}$ и начального хода $\delta_н$. При этом влияние экрана не учиты*-*вается. Расчет проводится по среднему значению силы. Статиче

ская электромагнитная характеристика также строится без учета влияния экрана.

В конечном положении якоря на работе электромагнита сказывается переменное во времени значение электромагнитной силы. В данном случае учитывается действие экрана.

При проектировании экрана учитываются данные электромагнита, полученные при проведении предварительного расчета:

$Q_{пк}$ — конечное значение противодействующих сил;

q — площадь полюса;

w — число витков катушки;

σ — коэффициент рассеяния магнитной системы в конечном положении якоря.

Выбор значений α и β

Расчетные данные для экрана определяются двумя основными соотношениями:

$$\alpha = \frac{q_1}{q_2} \quad (7\text{-}11); \qquad \beta = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (7\text{-}12).$$

Предельные значения α и β ограничиваются практическими условиями.

В определенной конструкции уменьшение значения α достигается за счет уменьшения q_1. При этом увеличивается величина B_1 индукции в неэкранированной части полюса, что приводит к резкому увеличению н. с. катушки.

Предельное значение B_1 принимается порядка $1{,}6 \cdot 10^{-4}$. Следует учитывать, что при малом значении α уменьшается размер m (фиг. 7,3), что создает трудности при штамповке.

В практических условиях $\alpha > (0{,}415 \div 0{,}425)$. Как указывалось выше, учитывая технологические условия, принимают значение $\beta = 1$.

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В литературных источниках приводятся разные методы проектирования экрана. Наиболее рациональное решение задачи получается при методе анализа работы системы, предложенном А. В. Шорыгиным. Пользуясь этим методом, Г. В. Могилевский получил в своей диссертационной работе весьма простые соотношения для расчета. Ниже приводятся основные положения, принятые Г. В. Могилевским при решении задачи.

Исходное уравнение

$$Q_{t\,мин} = Q_1 + Q_2 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2 \mp 2Q_1Q_2\cos 2\psi}. \qquad (7\text{-}19)$$

Примем следующие обозначения:

$$f = \frac{Q_{t\,мин}}{Q_c}, \qquad (7\text{-}21)$$

где

$$Q_{ср} = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p^2}{q_p} \qquad (7\text{-}22)$$

— среднее значение силы при отсутствии экрана;

$$q_0 = q_1 + q_2. \quad (7\text{-}23)$$

$$\tau = (1+\alpha)^2 r_э^2. \quad (7\text{-}24)$$

$$m = \alpha \left(\frac{\omega\mu_0 q_0}{\delta_2}\right)^2. \quad (7\text{-}25)$$

Разделив все члены уравнения (7-19) на $Q_{ср}$ и произведя соответствующие преобразования, получаем с учетом принятых обозначений

$$f = f(\alpha, \beta, m, \tau). \quad (7\text{-}26)$$

Задача расчета сводится к отысканию зависимости между значениями α, β и $r_э$, при которой величина f имеет максимальное значение.

При $r_э = 0$ и $r_э = \infty$ значение $f = 0$. Таким образом, имеется оптимальная величина сопротивления экрана, при которой получается значение $f_{макс}$.

Учитывая, что в зависимости (7-26) имеется одна переменная τ, берем производную $\frac{\partial f}{\partial \tau} = 0$.

Решая полученное уравнение, получаем следующие соотношения для расчета (с учетом $\beta = 1$):

$$\alpha = \frac{2-f}{4f}. \quad (7\text{-}27)$$

$$r_э = \frac{\omega\mu_0 q_0}{\delta_2} \cdot \frac{4f}{(3f+2)^2} \sqrt{4-f^2}. \quad (7\text{-}28)$$

Экран выполняется в виде кольца с неравномерным сечением. При конструировании экрана учитывают условия его охлаждения. Обычно экран выполняют из материала с относительно большим удельным сопротивлением — латуни или алюминия.

В части, расположенной в пазу, принимают меньшее сечение экрана с целью уменьшения ширины паза. В части вне паза увеличивают площадь кольца, благодаря чему увеличивается поверхность охлаждения экрана.

Значение превышения температуры Θ для экрана принимается различным. Если экран расположен вблизи катушки, значение Θ должно быть не больше 70°, если удалён от неё — допускается значение Θ порядка 100—120°.

Методика проведения расчета поясняется приводимым ниже примером.

7-6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭКРАНА (фиг. 7, 7).

1. Заданные величины: $U_н = 220$ *в*; $w = 4000$; $\sigma = 1{,}05$; $q = 1{,}8 \times 1{,}2 = 2{,}16$ *см²*; $Q_{пк} = 1{,}8$ *кГ*;

2. Исполнение полюса: учитывая паз шириной 2 *мм*, получаем

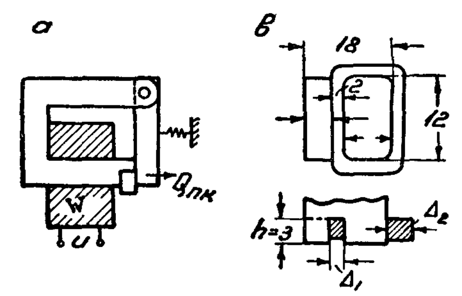
$$q_0 = 1{,}6 \times 1{,}2 = 1{,}92 \text{ см}^2.$$

3. Значение результирующего потока Φ_p: при определении $Q_{t\,мин}$ учитывается напряжение $U = 0{,}85U_н$, при определении потерь в экране $U = U_н$.

$$\Phi_p = \frac{\sqrt{2}\cdot 0{,}85U_н}{\sigma\omega w} = \frac{\sqrt{2}\cdot 0{,}85\cdot 220}{1{,}05\cdot 314\cdot 4000} = 2\cdot 10^{-4}\ вб.$$

4. Среднее значение силы при отсутствии экрана: из (7-22)

$$Q_{ср} = 2{,}03\cdot 10^8 \frac{\Phi_p^2}{q_0} = 2{,}03\cdot 10^8 \frac{4\cdot 10^{-8}}{1{,}92} = 4{,}22\ кГ.$$



Фиг. 7, 7. Эскизы к расчету экрана.

5. Коэффициент f: из (7-21)

$$f = \frac{k_н Q_{t\,мин}}{Q_{ср}} = \frac{1{,}1\cdot 1{,}8}{4{,}22} = 0{,}47.$$

6. Коэффициент α: из (7-27)

$$\alpha = \frac{2-f}{4f} = \frac{2-0{,}47}{4\cdot 0{,}47} = 0{,}81;\ q_1 = 0{,}858;\ q_2 = 1{,}062.$$

7. Сопротивление экрана:

$$r_э = \frac{\omega\mu_0 q_0}{\delta_2}\frac{4f}{(3f+2)^2}\sqrt{4-f^2} = 4{,}78\cdot 10^{-4}\ ом.$$

8. Угол ψ: из (7-16)

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\omega G_2}{r_э} = \frac{314\cdot 1{,}25\cdot 10^{-8}\cdot 1{,}062}{4{,}78\cdot 10^{-4}\cdot 5\cdot 10^{-3}} = 1{,}755.$$

$$\psi = 60^\circ 20';\ \cos\psi = 0{,}495;\ \cos 2\psi = -0{,}51.$$

9. Потоки: из (7-17)

$$\Phi_p = \sqrt{\Phi_2^2(1 + c^2 + 2c\cos\psi)};$$

из (7-14)

$$c = \frac{\alpha}{\cos\psi} = \frac{0{,}81}{0{,}495} = 1{,}63;$$

$$\Phi_2 = 0{,}87\cdot 10^{-4}\ вб;\ \Phi_1 = c\Phi_2 = 1{,}415\cdot 10^{-4}\ вб.$$

10. Силы:

$$Q_1 = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{1{,}415^2 \cdot 10^{-8}}{0{,}858} = 4{,}75 \text{ кГ}$$

$$Q_2 = 1{,}445 \text{ кГ}$$

$$Q' = \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2 - 2Q_1Q_2 \cos 2\psi} = 4{,}21 \text{ кГ}.$$

$$Q_{мин} = 4{,}75 + 1{,}445 - 4{,}21 = 1{,}985 \text{ кГ}.$$

По условию требуется $Q_{t\ мин} = 1{,}1 \cdot 1{,}8 = 1{,}98$ кГ.

11. Активные потери в экране:
из (7-20)

$$P = \frac{\omega^2 \Phi_2^2}{2 \cdot 0{,}85^2 \cdot r_э} = 1{,}17 \text{ вт}.$$

12. Индукция в неэкранированной части полюса:

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{q_1} = \frac{1{,}415 \cdot 10^{-4}}{0{,}858} = 1{,}65 \cdot 10^{-4} \frac{вб}{см^2}.$$

ГЛАВА 8

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ С ПОВОРОТНЫМ ЯКОРЕМ

8-1. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Формы магнитных систем. В практике применяются разнообразные формы магнитных систем, на фигуре 8, 1 приведены наиболее распространенные из них.

a) Система реле кодового типа; сердечник круглого сечения, без полюсной надставки. Такое решение принято из условия осуществления легкой и быстрой замены катушки.

b) Система реле кодового типа, но с Ш-образным магнитопроводом, сердечник круглого сечения. Такие системы применяют в замедленно действующих реле. Благодаря принятой форме магнитопровода увеличивается значение потока в системе при конечном положении якоря, что приводит к увеличению времени отпуска реле.

c) Система телефонного реле плоского типа, обладающая высокой чувствительностью, так как в этой системе сила на якоре создается не только потоком рабочего зазора, но и потоком рассеяния между сердечником и якорем.

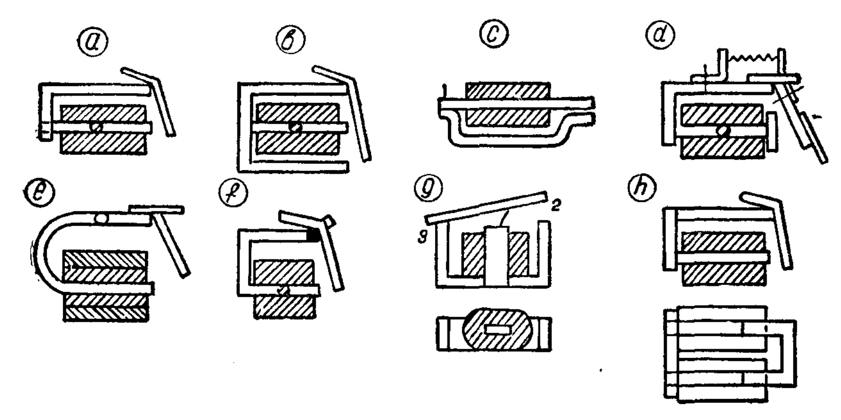
d) Система, принятая для различных реле управления и промежуточных.

e) Система, принятая для замедленно действующих реле управления. Особенностью её является отсутствие нерабочего зазора между сердечником и ярмом — магнитопровод выполнен цельным из железа Армко круглого сечения.

f) Система, принятая для высокочувствительных и быстродействующих реле. Магнитопровод её выполняется шихтованным из

листового материала с высоким значением магнитной проницаемости в слабых полях, например из пермаллоя. Якорь вращается на призме и удерживается на ярме специальной пружиной.

g) Система, принятая для промежуточных реле постоянного и переменного тока. Магнитопровод цельный, выштампованный из одной полосы кремнистой стали.



Фиг. 8, 1. Формы систем постоянного тока с поворотным якорем.

h) Сдвоенная система, принятая для быстродействующих реле, имеющих контакты большой разрывной мощности.

В практике применяются и другие формы систем, приспособленных к условиям работы механизма.

8-2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исходными для проектирования магнитной системы принимают данные исполнительной части реле: контактной системы, приводного механизма. Эти данные сводятся к двум основным величинам: начальной силе Q_n, или моменту M_n, и ходу механизма x, или углу поворота θ. Необходимо установить наиболее выгодные условия работы магнитной системы, т. е. подобрать такое значение хода якоря δ, при котором получается наибольшее значение условной работоспособности A (см. главу 5). Как правило, в системах постоянного тока значение δ принимают меньше x (см. фиг. 5, 3).

Для проектирования системы пользуются следующими основными соотношениями:

сила $Q = 4{,}06 \cdot 10^8 B_p^2 q$ *кГ* (6-5),

н. с. катушки F складывается из падения магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах $F_c + F_н$ и в рабочем зазоре F_p

$$F = F_p + F_c + F_н = \frac{B_p \delta}{\mu_0} + F_c + F_н \qquad (8\text{-}1)$$

напряжение

$$U = Ir = Iw\rho \frac{l_{cp}}{q} 10^{-3} \quad (8\text{-}2)$$

превышение температуры обмотки

$$\theta = \rho \frac{1}{20\mu f_\kappa h_\kappa l_\kappa^2} (Iw)^2, \quad (2{,}22)$$

где l_κ и h_κ в *мм*.

Пользуясь приведенными соотношениями, можно провести расчет магнитной системы готовой формы с определенными габаритами.

При проектировании же системы, когда нет данных о размерах ее отдельных частей, необходимо задаваться некоторыми значениями параметров, причем удачный выбор этих значений предопределяет экономичность конструкции. Поэтому вначале проводится предварительный расчет системы, данные которого уточняют в окончательном расчете.

В предварительном расчете приходится задаваться следующими значениями параметров: индукцией в рабочем воздушном зазоре B_p (принимается по значению к. ф. (фиг. 5, 5); коэффициентом рассеяния; падением магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах и др.

8-3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исходные данные. Заданными являются следующие данные: напряжение сети $U_н$, характеристика противодействующих сил $Q_n = f(\delta)$ или $M_n = \varphi(\delta)$.

На фигуре 8, 2 показаны два вида характеристик.

В случае (*a*) предварительный расчет проводится по значениям $Q_{пн}$ и $\delta_н$, в поверочном расчете уточняется значение $Q_э$ для точек *2* и *3*.

В случае (*b*) расчет по точке *1* привел бы к неверным результатам, ибо в точке *2* сила $Q_{э2}$ получается меньше Q_{n2}. Поэтому в данном случае расчет проводится по точке *2*: Q_{n2}, δ_2. Подобрав наиболее подходящие для магнитной системы значения $Q_{эн}$ и $\delta_я$ (см. главу 5), перестраивают механическую характеристику с тем, чтобы на оси абсцисс были отложены значения $\delta_я$.

Диаметр полюсного наконечника. Установив значение конструктивного фактора $\frac{\sqrt{Q_n}}{\delta}$ определяют по кривой, изображенной на фигуре 5, 5, величину индукции B_p — в рабочем зазоре. Из формулы $Q = 4{,}06 \cdot 10^8 B_p^2 q$ определяют значение q и диаметр полюсного наконечника.

Диаметр сердечника. Задаются значением σ — коэффициента рассеяния и величиной B_c индукции в стали. Значение B_c при-

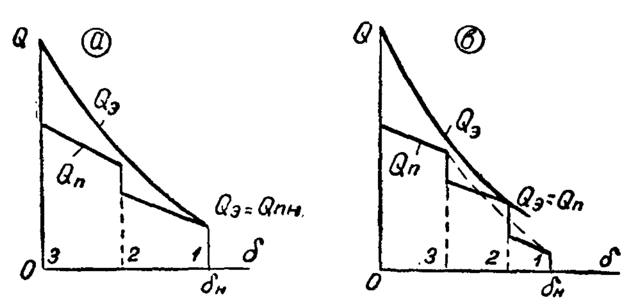
нимают порядка $(1{,}2 \div 1{,}4)\,10^{-4}\,\frac{вб}{см^2}$ для мощных магнитных систем и порядка $(0{,}4 \div 0{,}7)\,10^{-4}\,\frac{вб}{см^2}$ для релейных систем.

Поток у основания сердечника

$$\Phi = \sigma\Phi_p = \sigma B_p q;$$

$$q_c = \frac{\sigma B_p q}{B_c}. \qquad (8\text{-}3)$$

Полученное значение q_c относится к сердечнику и к ярму, сечение якоря может быть взято несколько меньшим.



Фиг. 8, 2. Тяговые характеристики электромагнитов.

Н. с. катушки. $F_p = \frac{B_p\delta}{\mu_0}$.

Задаются величиной $F_c + F_н = \alpha F$ (α принимается порядка $0{,}15 \div 0{,}35$, см. 5-6).

Тогда

$$F = F_p + \alpha F = \frac{B_p\delta}{\mu_0(1-\alpha)}. \qquad (8\text{-}4)$$

Размеры катушки. Задаются значением $k = \frac{l_к}{h_к}$ — отношением длины катушки к толщине намотки, коэффициентом заполнения катушки $f_к$ (приблизительно 0,5) и допускаемой температурой превышения (см. главу 2). Подставляя в уравнение (2-21) $Iw = \frac{F}{0{,}85}$; ρ — соответствующее температуре $\vartheta_0 + \theta$, принятое значение $f_к$, коэффициент теплоотдачи μ (см. главу 2), заменив $l_к = h_к k$, получают из (2,22)

$$h = \sqrt[3]{\frac{\rho F^2}{20 \cdot 0{,}85^2 \mu f_к \theta k^2}}. \qquad (8\text{-}5)$$

При проведении расчета следует принять во внимание то, что напряжение U, подведенное к катушке, может изменяться в процессе эксплуатации в пределах от $0{,}85\,U_н$ до $U_н$. Поэтому при вычислении силы учитывают $U = 0{,}85\,U_н$, а при вычислении температуры превышения учитывают полное $U_н$. Таким образом, значение F из (8-4) относится к случаю $U = 0{,}85\,U_н$.

Диаметр проволоки.

Из выражения (8-2) следует:

$$q_м = \frac{\rho l_{cp} F \cdot 10^{-3}}{U}. \qquad (8\text{-}6)$$

Здесь $q_м$ — площадь сечения проволоки в $мм^2$;

$l_{ср}$ — средняя длина витка в *мм*, которая может быть вычислена по размерам сердечника и катушки.

Диаметр голой проволоки $d = \sqrt{\frac{4q_м}{\pi}}$. Полученное значение может не соответствовать шкале нормальных диаметров по ГОСТ. В таких случаях принимают ближайшее значение по шкале (см. главу 2).

8-4. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В поверочном расчете выясняют правильность принятых в предварительном расчете данных, уточняют заданные соотношения, определяют оптимальное значение величины B_p. При несоответствии полученных результатов с заданными и оптимальными проводят новый вариант расчета с измененными параметрами.

Катушка. Принимают по условиям эксплуатации или производства конструктивную форму катушки — каркасную или бескаркасную, и материал изоляции проволоки.

Определяют по изоляции катушки размеры намотки $l_н$ и $h_н$, уточняют значения коэффициента заполнения, среднего значения витка.

Число витков катушки

$$w = f_н \frac{4 l_н h_н}{\pi d^2}. \qquad (8\text{-}7)$$

Н. с. $F = \frac{U}{r} w$; значение r определяют с учетом ρ (горячее).

Температура превышения уточняется по полученным уточненным данным катушки (см. 2-21). Если температура превышения получается выше допустимой, необходимо пересчитать катушку с ближайшим по шкале меньшим диаметром проволоки.

Проводимость воздушных зазоров. Вычисляют проводимости: G_p — рабочего потока, $G_к$ — краевого, $G_н$ — нерабочих, G_{yn} — проведенного значения потока утечки.

Вычисляют значение коэффициента рассеяния

$$\sigma = 1 + G_{yn} \frac{G_p + G_к + G_н}{(G_p + G_к) G_н}. \qquad (8\text{-}8)$$

Построение кривой намагничения. Строится кривая $F = f(F_r + F_н)$ для начального положения якоря (фиг. 3, 26), на оси абсцисс откладывается значение F, соответствующее $0{,}85 Iw$, где Iw — н. с.,

соответствующая полному напряжению сети, в точке a проводится прямая под углом α. Значение α определяется из условия

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_p + G_к}{p},$$

где p — коэффициент, представляющий собой отношение масштабов Φ и F.

Полученное из диаграммы значение F_p учитывается при вычислении силы по уточненной формуле

$$Q_э = 5{,}1 F_p^2 \frac{dG}{d\delta}. \qquad (6\text{-}13)$$

Если полученное значение $Q_э$ больше или меньше требуемого, производят изменения в конструкции магнитной системы.

В первую очередь проверяют, получены ли оптимальные данные системы (см. параграф 5-7) и для того чтобы получить их, меняют диаметр полюсного наконечника.

Построение тяговой характеристики. После того как получены окончательные данные расчета, необходимо построить тяговую характеристику $Q_э = f(\delta)$. Вычисляют значение $Q_э$ для нескольких (трех, четырех) точек хода якоря, для чего строят соответствующие кривые намагничивания. Для каждого положения якоря вычисляют σ, F_p и $\frac{dG}{d\delta}$.

8-5. ПРИМЕР РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Требуется разработать систему для следующих условий:

начальный момент $M = 2$ *кГ·см*;

угол поворота якоря $\alpha = 9°$;

номинальное напряжение $U_н = 110$ вольт. Это напряжение в процессе эксплуатации может снижаться до $U = 0{,}85 U_н$.

а) Предварительный расчет. В предварительном расчете необходимо задаться некоторыми величинами:

B_p — индукцией в рабочем воздушном зазоре;

B_c — индукцией в стали;

$F_c + F_н$ — потерей м. д. с. в стали и нерабочих зазорах при отпущенном якоре;

$k = \frac{l_к}{h_к}$ — отношением длины катушки к толщине намотки.

Все эти величины зависят от силы $Q_{эн}$ и хода якоря $\delta_н$, отнесенным к среднему радиусу R_c (фиг. 8, 3).

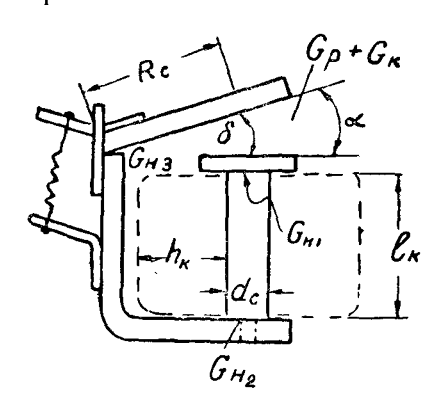
При заданном моменте $M_{эн}$, принимая различные значения $\delta_н$, можно получить различные значения R, и, таким образом, подобрать наиболее выгодное соотношение между Q и δ, соответствующее лучшим показателям работоспособности системы клапанного типа (см. параграф 5-4).

Примем $\delta_н = 0{,}4$ *см*.

Так как зазор $\delta = R_c \cdot \alpha$; $Q_{эн} \cdot R_c = M_{эн}$, то

$$Q_{эн} = \frac{M_{эн}}{R_c} = \frac{M_{эн}\,\alpha}{\delta} = \frac{2 \cdot 9}{57{,}4 \cdot 0{,}4} = 0{,}78\ кГ.$$

При таком соотношении $Q_{эн}$ и $\delta_н$ задаются значением $B_p = 0{,}16 \cdot 10^{-4}$.



Фиг. 8, 3. Эскиз магнитной системы.

1. Пользуясь формулой $Q = 4{,}06 \cdot 10^8 B_p^2 q$ определяем поверхность $q_{пн}$ — полюсного наконечника:

$$q_{пн} = \frac{0{,}78}{4{,}06 \cdot 0{,}16^2} = 7{,}6\ см^2.$$

Принимаем $d_{пн} = 3{,}0$ *см*, тогда $q_{пн} = 7{,}06\ см^2$.

Вследствие уменьшения значения $q_{пн}$ с 7,6 до 7,06 увеличивается индукция B_p до $0{,}1665 \cdot 10^{-4}$.

2. Для определения сечения сердечника задаемся значением $B_c = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$; материал — слабоуглеродистая сталь; коэффициент рассеяния системы $\sigma = 2$.

Площадь сечения сердечника

$$q_c = \frac{B_p q_{пн} \cdot \sigma}{B_c} = \frac{0{,}1665 \cdot 10^{-4} \cdot 7{,}06 \cdot 2}{1{,}1 \cdot 10^{-4}} = 2{,}14\ см^2.$$

Принимаем $d = 1{,}7$ *см*; тогда $q_c = 2{,}26\ см^2$.

Ярмо-скобу, а также якорь исполняем из полосового материала 5×40 *мм*.

$$q_я = 2{,}0\ см^2.$$

3. Для определения н. с. системы задаемся падением магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах в разомкнутой системе. Учитывая, что в данной конструкции имеется три нерабочих зазора, принимаем несколько повышенное значение потерь

$$F_c + F_н = 0{,}3F,$$

$$F = \frac{B_p \cdot \delta}{\mu_0 (1 - \alpha)} = \frac{0{,}1665 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-4}}{1{,}25 \cdot 0{,}7 \cdot 10^{-8}} = 760.$$

При вычислении моментов на якоре учитывают н. с., получающиеся при пониженном напряжении $U = 0{,}85U_н$. Этому напряжению будет соответствовать н. с. F_1.

При вычислении превышения температуры учитывают F, соответствующую полному напряжению

$$F = \frac{F_1}{0{,}85} = \frac{760}{0{,}85} = 895.$$

4. Размеры катушки находим так: принимаем материал намотки — медь с эмалевой изоляцией, превышение температуры $\theta = 60°$,

катушка бандажированная, коэффициент теплоотдачи по шкале A (табл. 8).

$$\mu = 11{,}92 \cdot 10^{-4}.$$

Отношение длины катушки к её высоте

$$k = \frac{l_к}{h_к} = 6 \cdot$$

$$h_к = \sqrt[3]{\frac{23{,}39 \cdot 10^{-3} \cdot 895^2}{20 \cdot 60 \cdot 11{,}92 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}45 \cdot 30}} = 9{,}32 \text{ мм}.$$

Принимаем $h_к = 10$ *мм*.

5. На основании полученных данных исполняется эскиз магнитной системы (фиг. 8, 3).

В данной конструкции величина $R_c = \frac{\delta}{a} = \frac{4 \cdot 57{,}4}{9} = 25{,}6$ *мм*.

б) Поверочный расчет. 1. Проводимости воздушных зазоров вычисляются обычно для трех положений якоря: начального, промежуточного и конечного — при притянутом якоре.

При вычислении проводимостей рабочего зазора при притянутом якоре (0°) величина δ учитывается как сумма: величины минимального возможного зазора 0,05 *мм* и толщины цинкового покрытия на полюсном наконечнике и якоре 0,03 *мм* (считая по 15 микрон на сторону).

Такая же величина зазора учитывается при вычислении проводимостей нерабочих зазоров — в стыках между полюсным наконечником и сердечником, между сердечником и ярмом. Для других положений якоря отдельно вычисляем проводимости рабочего зазора: $G_р$ — рабочую и $G_к$ — краевую.

2. Коэффициенты рассеяния определяются по проводимостям. Полный коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{G_р + G_к + G_{уп}}{G_р}.$$

Коэффициент рассеяния рабочего зазора

$$\sigma_к = \frac{G_р + G_к}{G_р}.$$

Ниже приведена сводная таблица данных проводимостей и коэффициентов рассеяния, обозначения соответствуют обозначениям фигуры 8, 3.

Положение якоря	$10^8 G_р$	$10^8 G_к$	$10^8 G_{н1}$	$10^8 G_{н2}$	$10^8 G_{н3}$	$10^8 G_{уп}$	σ	$\sigma_к$
9°	22,06	11,35	353	1000	112	12	2,06	1,51
3°	66,18	15,2	353	1000	206	12	1,41	1,23
0°	1100		353	1000	385	12		

3. Для построения кривой намагничивания (для начального положения якоря) задаемся значениями рабочего потока Φ_p:

$$1 \cdot 10^{-4}, \quad 1{,}5 \cdot 10^{-4}, \quad 1{,}7 \cdot 10^{-4} \text{ вебер.}$$

Методика подсчета $F_c + F_н$ приведена в главе 3.

Строим кривую намагничивания $\Phi_p = f(F)$.

Отношение масштабов Φ и F равно $20 \cdot 10^{-8}$;

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{G_p}{p} = \frac{22{,}06}{20} = 1{,}1; \quad \alpha = 49°.$$

Получаем

$$\Phi_p = 1{,}16 \cdot 10^{-4}\ вб; \quad Q_{эн} = \frac{4{,}06 \cdot 10^8 \cdot 1{,}16^2 \cdot 10^{-8}}{7{,}06} = 0{,}735\ кГ.$$

Несколько сниженное по сравнению с расчетным (0,78 *кГ*) значение силы получилось из-за повышенного значения $F_c + F_н$.

Проверка оптимальности принятого значения индукции B_p производится по кривой намагничивания (см. главу 5).

Площадь треугольника $ab_1c_1 = \frac{11{,}6 \cdot 510}{2} = 2850$;

» » $ab_2c_2 = 3070$;

» » $ab_3c_3 = 3000$.

Оптимальные условия соответствуют потоку $\Phi_p = 1{,}28 \cdot 10^{-4}\ вб$, который получается при угле $\alpha_2 = 52°$; $\operatorname{tg} 52° = 1{,}28$:

$$G_p = 1{,}28 \cdot 20 \cdot 10^{-8} = 25{,}6 10^{-8}\ вб/ав.$$

Этому условию соответствует полюсный наконечник диаметром 32 *мм*.

Таким образом, надо принять

$$d_{пн} = 32\ мм; \quad q_{пн} = 8{,}04\ см^2.$$

При этом условии сила на якоре

$$Q_{эн} = \frac{1{,}28^2 \cdot 10^{-8}}{8{,}04} \cdot 4{,}06 \cdot 10^8 = 0{,}825\ кГ.$$

Получается некоторый запас в силе, благодаря чему возможно снизить величину н. с. системы.

4. Определение числа витков и диаметра проволоки катушки. Размеры катушки: $D_н = 38\ мм$; $D_в = 18\ мм$; $l_к = 60\ мм$. Средняя длина витка

$$l_{ср} = \frac{\pi(38 + 18)}{2} = 88\ мм.$$

Сечение $q_м$ меди намотки определяем из уравнения напряжения

$$U_н = Ir = \rho \frac{l_{ср}}{q} Iw \cdot 10^{-3};$$

$$q_м = \frac{\rho l_{ср} Iw\, 10^{-3}}{U_н} = \frac{23{,}39 \cdot 10^{-3} \cdot 88 \cdot 10^{-3} \cdot 895}{110} = 16{,}7 \cdot 10^{-3}\ мм^2.$$

Наиболее близкий диаметр проволоки

$d = 0{,}15$ *мм*; $q_м = 17{,}6 \cdot 10^{-3}$ *мм*^{2},

d_1 проволоки с изоляцией равно 0,17 *мм*.

Коэффициент заполнения намотки $f_н$:

$$f_н = k_v \frac{q_м}{d_1 (d_1 + \delta)} = 0{,}9 \frac{17{,}6 \cdot 10^{-3}}{0{,}17 \cdot 0{,}20} = 0{,}463.$$

Задаваясь размерами изоляции катушки, получаем размеры намотки

$l_н = 56$ *мм*, $h_н = 8$ *мм*.

Тогда

$$w = f_н \frac{l_{ср} \cdot w}{q_м} = 0{,}463 \cdot \frac{56{,}8}{17{,}6 \cdot 10^{-3}} = 11\,800;$$

$$r = \rho \frac{l_{ср} \cdot 10^{-3}}{q_м} w = 1370 \text{ ом};$$

$$\text{ток } I = \frac{U}{r} = \frac{110}{1370} = 0{,}08 \; a;$$

$$F = 0{,}08 \cdot 11800 = 950 \text{ ав}.$$

Потери в катушке

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{110^2}{1370} = 8{,}8 \text{ вт}.$$

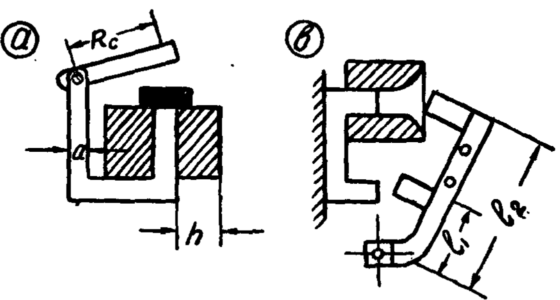
5. Для получения данных $Q_э = f(\delta)$ требуется построить кривые намагничивания для промежуточного и конечного положений якоря.

6. Для вычисления коэффициента возврата строят кривую размагничивания и определяют н. с. отпуска (метод вычисления коэффициента возврата см. в главе 5).

8-6. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Формы магнитных систем. Ниже рассматриваются наиболее распространенные системы с поворотным якорем.

1) Фиг. 8, 4 *а*. Обычная форма, применяемая для исполнения разных реле управления. Магнитопровод шихтованный из листов электротехнической стали, ось вращения якоря располагается против ярма, экран—на сердечнике.



Фиг. 8, 4. Формы систем переменного тока с поворотным якорем.

2) Фиг. 8, 1 *g*. Форма исполнения для промежуточных реле с контактами малой разрывной мощности. Особенность системы в том, что она выполнена из листовой кремнистой стали

2 *мм*. Такая же форма применяется и для систем постоянного тока, в этом случае экран удаляется.

3) Фиг. 8, 4 *b* — система с П-образным якорем и ярмом. Применяется для исполнения реле управления и контакторов переменного тока.

4) Для многоамперных контакторов переменного тока применяется система с Е-образным якорем и ярмом.

Вопросы исполнения магнитных систем. 1) Сечение магнитопровода. По условиям работы катушки магнитопровод лучше всего выполнять с квадратным сечением. Однако часто предпочитают делать его прямоугольным, так как при таком исполнении якорь в притянутом состоянии обладает бо́льшей устойчивостью в отношении вибраций при возникающих в конструкции боковых составляющих моментов пружин.

2) Зазоры. Во избежание залипания якоря необходимо выполнить магнитную систему так, чтобы при притянутом якоре оставались нерабочие воздушные зазоры порядка 0,2 — 0,5 *мм*: в системе, изображенной на фигуре 8, 4 *a*, этот зазор предусматривается у основания якоря; в системе, приведенной на фигуре 8, 1*g* — у конца якоря — зазор *3*, в Е-образной системе — в средней части якоря. В месте соприкосновения якоря с экранированным полюсом зазор должен быть доведен до минимума, для чего места соприкосновения отшлифовывают.

Исходные данные. Исходными являются следующие данные: рабочее напряжение, начальное значение силы или момента, начальный ход якоря или угол поворота. Необходимо учитывать, что максимальное значение условной работоспособности *A* в системах переменного тока получается при бо́льших значениях хода якоря, чем у систем постоянного тока. Рекомендуется выполнять связь между электромагнитом и исполнительным механизмом так, чтобы угол поворота якоря получился максимально возможным (фиг. 5, 3).

Ход расчета. 1) Строится диаграмма механических сил

$$Q_n = f(\delta) \quad \text{или} \quad M_n = \varphi(\theta).$$

2) Полученная диаграмма перестраивается по отношению к силам или моментам на якоре: получают диаграмму, приведенную к якорю.

3) Проводят предварительные расчеты системы и устанавливают основные размеры ее.

4) Проводят окончательный расчет для уточнения данных предварительного. Если получаются неудовлетворительные результаты, пересчитывают систему, задавшись другими значениями параметров.

8-7. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА

Уравнение силы. В предварительных расчетах удобнее пользоваться формулой Максвелла (6-8)

$$Q_э = 2{,}03 \cdot 10^8 B_p^2 q_p,$$

где B_p — амплитудное значение индукции в рабочей части воздушного зазора;

q_p — сечение рабочей части зазора, *см*².

Оптимальное значение B_p колеблется в больших пределах. Для ориентировки в выборе B_p можно пользоваться кривыми, изображенными на фигуре 5, 5, но при этом следует учитывать, что величина к. ф. должна определяться для систем переменного тока из условия $\frac{\sqrt{2Q}}{\delta}$. В системе, приведенной на фигуре 8, 4 *a* имеется один рабочий зазор и сила определяется величиной магнитного потока в этом зазоре. Сила в нерабочем зазоре не учитывается. В других, более сложных магнитных системах, например Ш- и Е-образных, имеется два или три рабочих зазора и сила определяется величиной потока во всех этих зазорах.

В этих случаях также применима формула (6-8), где значения B_p и q_p относят к одному зазору. Так, в П-образной системе с осью вращения вне полюса при заданном моменте можно определить следующим образом приведенное значение Q (фиг. 8, 4*b*):

$$M = Q_1 l_1 + Q_2 l_2.$$

Принимая одинаковыми сечения стали полюсов и не учитывая потоков рассеяния, можно считать $Q_1 = Q_2 = 2{,}03 \cdot 10^8 B_p^2 q$. Тогда приведенное значение Q:

$$Q = \frac{M}{l_1 + l_2}.$$

В Ш-образной системе (фиг. 8, 1*g*) не учитывают в разомкнутом положении якоря силу у полюса *2*.

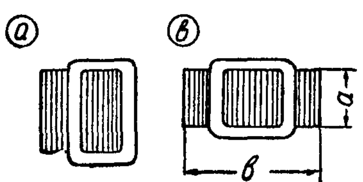
Коэффициент рассеяния. В предварительном расчете необходимо задаваться значением коэффициента рассеяния σ, причем краевые потоки рабочего зазора также относят к потокам рассеяния. Значение σ колеблется в пределах $1{,}5 \div 3$, меньшее значение получается в системах с малым углом поворота якоря, бóльшее — с бóльшим углом поворота (порядка 12—15°).

Отношение $k = \frac{l_k}{h_k}$ принимается в зависимости от величины к. ф.: бóльшему значению к. ф. соответствует мéньшая величина отношения.

8-8. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема расчета. а) Заданные величины: $U_н$, начальное значение момента противодействующих сил $M_{пн}$, $\theta_н$.

б) Для предварительного расчета необходимо определить значение силы $Q_{эн} = \frac{M_{пн}}{R_c}$ (фиг. 8, 4 *а*). Величина R_c определяется из конструктивных соображений. Учитывая, что в системах переменного тока условная работоспособность $A = Q\delta$ получается бо́льшей при относительно больших зазорах, выгоднее увеличивать $\delta = R_c\theta$ и уменьшать $Q_{эн}$. Принимают $R_c = (1,2 - 1,5)\, R_k$ (фиг. 5, 3).



Фиг. 8, 5. Размещение экрана.

в) Площадь сечения рабочей части воздушного зазора. Задавшись значением B_p, вычисляют q из (6-8):

$$q = \frac{Q_{эн}}{2{,}03 \cdot 10^8 B_p^2}.$$

Полное сечение q_c сердечника получается несколько меньшим. С учетом k_c коэффициента заполнения пакета (порядка 0,9—0,95)

$$q_c = k_c q \text{ кв. см.}$$

г) Поток в системе. Учитывается полное значение потока, для чего задаются σ — коэффициентом рассеяния.

$$\Phi = \sigma k_c q B_p \text{ вебер.}$$

д) Число витков катушки. Принимают, что при разомкнутом якоре $E \cong (0{,}97 \div 0{,}98)U$; далее учитывают, что требуемое значение силы на якоре должно иметь место при пониженном напряжении

$$U = 0{,}85U_н.$$

Получаем

$$E = 0{,}98 \cdot 0{,}85U_н = \frac{\omega\Phi w}{\sqrt{2}};$$

$$w = \frac{0{,}98 \cdot 0{,}85\sqrt{2}\, U_н}{\omega\Phi}.$$

е) Размеры сердечника в плане. Площадь сечения сердечника $q = ab$. В электромагнитах небольшой мощности стремятся к квадратному сечению, благодаря чему уменьшается средняя длина витка. Экран размещается согласно изображению на фигурах 8, 5 *а* и 8, 5 *b*. В мощных электромагнитах, в целях большей устойчивости якоря при притянутом его положении, принимают $b > a$.

ж) Катушка. В электромагнитах переменного тока применяются каркасные катушки, при тяжелых условиях работы (повторно-кратковременный режим, условия среды) применяют бескаркасные катушки. Размер h катушки определяется из следующих условий:

принимая сечение ярма равным сечению сердечника, получают $c = R_c - 2a$ (фиг. 8, 4), далее, учитывая необходимость свободной посадки катушки, размер h принимают несколько меньшим размера c (на 0,2—0,3 *см*).

В зависимости от значения к. ф. $= \frac{\sqrt{2Q}}{\delta}$ принимают отношение l_h/h_k.

8-9. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Катушка. Устанавливаются размеры намотки $l_н$ и $h_н$, которые получаются из размеров катушки $l_к$ и $h_к$, за вычетом изоляции. Диаметр проволоки определяют тремя этапами:

1) Задаются коэффициентом заполнения намотки $f_н$, в среднем порядка 0,5 (см. расчет катушек). Из соотношения $w = f_н \frac{4l_н \cdot h_н}{\pi d^2}$ определяют d голой медн.

2) Проверяется значение $f_н$. При исполнении катушки с прокладкой бумаги через слой, учитывая d_1 — диаметр проволоки с изоляцией

$$f_н = k_v \frac{\pi d^2}{4d_1(d_1 + \delta)}.$$

3) С уточненным значением $f_н$ снова вычисляется диаметр проволоки. Принимается значение d, ближайшее по ГОСТ.

Проводимости воздушных зазоров. Вычисляются проводимость $G_в = G_р + G_к$, нерабочего зазора $G_н$ и приведенная по числу потокосцеплений проводимость утечки $G_{ус}$. Далее определяется производная $\frac{dG_в}{d\theta}$. Для вычисления σ — коэффициента рассеяния, пользуются схемой замещения. Вычисления проводимостей и σ проводят для нескольких точек, например, θ_1, θ_2 и $\theta = 0$; данные расчета сводят в таблицу. При $\theta = 0$ обычно считают величину рабочего зазора 0,005 *см*; нерабочего 0,02 *см*.

Значение момента в начальном положении якоря. Для $\theta_н$

$$M_{эн} = \frac{5{,}1 \cdot 0{,}85^2 U^2}{\omega^2 w^2 \sigma G_в^2} \frac{dG_в}{d\theta} \text{ кГ см}.$$

Если полученное значение $M_{эн}$ отличается от заданного, меняют число витков катушки с тем, чтобы приблизиться к значению $M_{пн}$. При изменении w вновь определяют диаметр проволоки. Необходимо стремиться к полному заполнению окна катушки, чтобы не ухудшать условий ее охлаждения.

Значение момента при угле θ_2. При проверке этого значения $M_{э2}$ должен быть больше $M_{п2}$. В противном случае необходимо увеличивать значение $M_{эн}$.

Значение силы при $\theta \cong 0$ (конечное положение якоря). В этом случае удобнее пользоваться формулой Максвелла. Без учета действия экрана среднее значение силы:

$$Q_{эо} = 2{,}03 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{\sigma^2 q'} \text{ кГ}.$$

В данном случае $q' < q$, так как в магнитопроводе предусматривается вырез (порядка 2 *мм*) для укладки экрана.

Расчет экрана (см. главу 7).

Токи в катушке. Расчет проводится при $U_н$. Вычисляются токи при разомкнутом и замкнутом положениях якоря (см. главу 3).

Нагрев катушки. Из уравнения нагрева $P = \mu S\theta$, где P — полные потери $P = P_k + P_n + P_э$, определяют температуру превышения θ.

Проверка эффективности использования магнитной системы проводится из соотношения

$$k = \frac{I_н - I_0}{I_н},$$

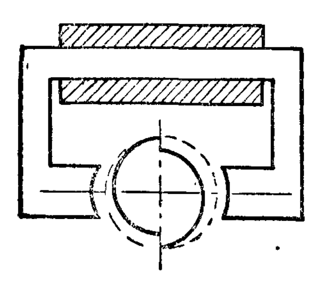
где $I_н$ и I_0 — соответственно значения токов при разомкнутом и замкнутом положениях якоря.

ГЛАВА 9

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ С ПОПЕРЕЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЯКОРЯ

9-1. ФОРМЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Системы с поперечным движением якоря отличаются тем, что якорь в них движется в поперечном направлении к средней линии между полюсами. Применяются такие системы в тех случаях, когда требуется получить высокое значение коэффициента возврата, например при проектировании автоматических регуляторов или специальных реле.



Фиг. 9, 1. Эскиз системы.

Особенностью рассматриваемых систем является то, что в них рабочий воздушный зазор между якорем и полюсом имеет небольшое значение при всем ходе якоря. В этом случае закон изменения профиля якоря определяет собой закон изменения момента. Изменяя профиль якоря можно получить любые требуемые виды характеристик. Системы с поперечным движением якоря применяют предпочтительно в устройствах постоянного тока, так как наличие в системе постоянного зазора между полюсами и якорем затрудняет условия устранения вибраций, возникающих в системах переменного тока. Практическое применение получили следующие формы магнитных систем.

а) Системы со сплошным якорем (фиг. 9, 1), применяющиеся при углах поворота якоря до 100—110°. Для получения требуемых тяговых характеристик якорю придают различные профили: арифметической спирали, гиперболы, параболы и другие.

б) Системы с выступающим якорем (фиг. 9, 5), которые применяются при углах поворота порядка 25—40°.

в) Системы с втягивающимся якорем (фиг. 9,8), применяющиеся при небольших углах поворота якоря (10—15°), но в случаях, когда требуется получение тяговой характеристики особого вида.

9-2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И ДАННЫЕ

Рассматриваются только системы $F = пост.$

Моменты на якоре: $M = 5{,}1F_p^2 \frac{dG}{d\theta}$ *кГ см.* Полная проводимость рабочих воздушных зазоров

$$G_в = G_p + G_к; \quad \frac{dG_в}{d\theta} = \frac{dG_p}{d\theta} + \frac{dG_к}{d\theta}.$$

В системах с поперечным движением якоря значение $\frac{dG_к}{d\theta}$ оказывает влияние на величину момента только в крайних положениях якоря, когда выступающая его часть находится вблизи полюса. В рабочем диапазоне положения якоря

$$\frac{dG_к}{d\theta} \ll \frac{dG_p}{d\theta}.$$

Поэтому в практических расчетах учитывают только $\frac{dG_p}{d\theta}$.

Индукция B_p. Значение B_p меняется с ходом якоря. В среднем для начального положения якоря индукция в сечении полюса принимается порядка $(0{,}3 \div 0{,}4)\, 10^{-4} \frac{вб}{см^2}$.

Полюсная дуга α (фиг. 9, 2). Значение α принимается: в системах со сплошным якорем порядка 45—70°, с выступающим якорем 60—65°.

Рабочий угол поворота выбирается из условия устранения влияния краевого потока, сказывающегося при крайних положениях якоря: в системах со сплошным якорем порядка 100—110°, с выступающим 25 ÷ 40°.

Значения минимальных воздушных зазоров $\delta_{мин}$ принимаются из конструктивных условий порядка 0,3 ÷ 0,5 *мм.*

9-3. СИСТЕМЫ СО СПЛОШНЫМ ЯКОРЕМ

В таких системах якорь очерчен по специальному профилю (фиг. 9, 2) радиусом $R_x = f(\theta)$, где θ угол отсчета от оси симметрии якоря.

Обозначим: R_0 — минимальный радиус, R_1 — максимальный. Зазор между полюсом, очерченным по окружности радиусом R, и якорем: $\delta_x = R - R_x = R - f(\theta)$. Минимальный зазор получается при $R_1 : \delta_0 = R - R_1$. Определим проводимость между полюсом и якорем. Выделим элементарный объем воздушного промежутка

шириной в средней части $d\varsigma$, длиной δ:

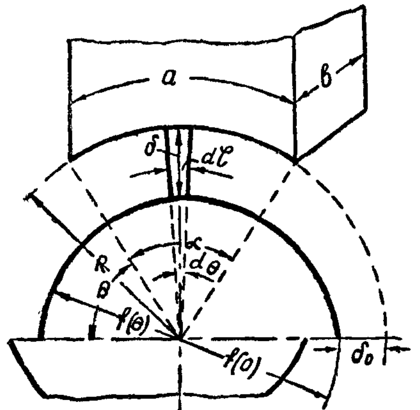
$$d\varsigma = \left[f(\theta) + \frac{\delta}{2}\right] d\theta = [f(\theta) + \frac{R - f(\theta)}{2}] d\theta = 0{,}5\,[R + f(\theta)]\, d\theta.$$

Элементарная проводимость зазора

$$dG_p = \mu_0 \frac{d\zeta b}{\delta}.$$

Полная проводимость между полюсом и якорем без учета проводимостей краевых потоков

$$G_p = 0{,}5\mu_0 b \int\limits_{\theta}^{\theta+\alpha} \frac{R + f(\theta)}{R - f(\theta)} d\theta. \qquad (9\text{-}1)$$



Фиг. 9, 2. Профиль полюса и якоря.

Для вычисления моментов необходимо знать производную проводимости по углу. Учитывая два последовательно включенных воздушных промежутка, имеем

$$\frac{dG_p}{d\theta} = 0{,}25\mu_0 b \frac{d}{d\theta} \int\limits_{\theta}^{\theta=\alpha} \frac{R + f(\theta)}{R - f(\theta)} d\theta =$$

$$= 0{,}25\mu_0 b \left[\frac{R + f(\theta+\alpha)}{R - f(\theta+\alpha)} - \frac{R + f(\theta)}{R - f(\theta)}\right] =$$

$$= 0{,}5\mu_0 bR \frac{f(\theta + \alpha) - f(\theta)}{[R - f(\theta + \alpha)][R - f(\theta)]} \qquad (9\text{-}2)$$

Выбор профиля якоря, т. е. закона изменения R_x, производится в зависимости от требуемого закона изменения тяговой характеристики $M_э = M(\theta)$.

$$M_э = 5{,}1 \cdot F_p^2 \frac{dG}{d\theta} = 2{,}55\mu_0 F_p^2 bR \frac{f(\theta + \alpha) - f(\theta)}{[R - f(\theta + \alpha)][R - f(\theta)]}. \qquad (9\text{-}3)$$

Обозначим: $A = 2{,}55F_p^2\mu_0 bR$,
тогда

$$M_э = A \frac{f(\theta + \alpha) - f(\theta)}{[R - f(\theta + \alpha)][R - f(\theta)]}. \qquad (9\text{-}4)$$

Из (9-4)

$$f(\theta + \alpha) = \frac{Af(\theta) + R^2 M_э - RM_э f(\theta)}{A + RM_э - M_э f(\theta)}. \qquad (9\text{-}5)$$

При $\theta = \pi$ получается минимальный зазор: $R - R_1$.

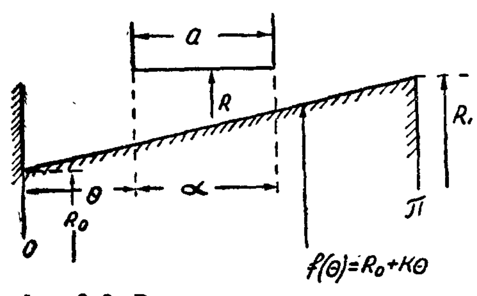
Для получения большей наглядности рассматривают профили полюса и якоря в развертке (фиг. 9, 3), где показана развертка якоря, очерченного по арифметической спирали.

$$R_x = f(\theta) = R_0 + k\theta. \qquad (9\text{-}6)$$

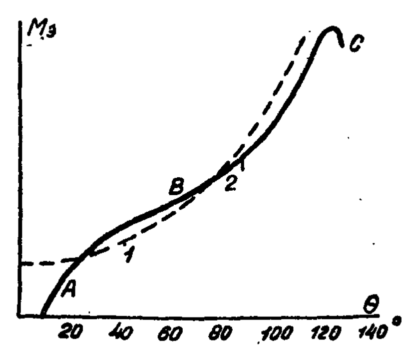
Подставляя (9-6) в (9-2), получаем:

$$\frac{dG_p}{d\theta} = 0{,}5\mu_0 bR \frac{k\theta}{[R - R_0 - k(\theta + \alpha)][R - R_0 - k(\theta)]}. \qquad (9\text{-}7)$$

Момент $M_э$ изменяется по гиперболическому закону (см. пунктир на фиг. 9, 4); сплошной показана экспериментальная кривая, полученная в Харьковском политехническом институте инженером К. И. Диденко при проведении им исследования системы. Разница между расчетной и экспериментальной кривыми определяется следующими факторами: участки A и C действием краевого потока, участок B — изменением величины н. с. F_p, приходящейся на зазоры, по ходу якоря.



Фиг. 9, 3. Развертка полюса и якоря.

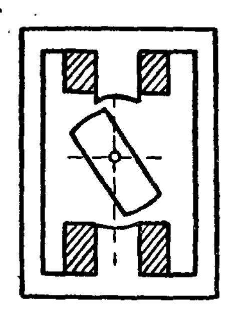


Фиг. 9, 4. Тяговые характеристики системы $F = пост$:

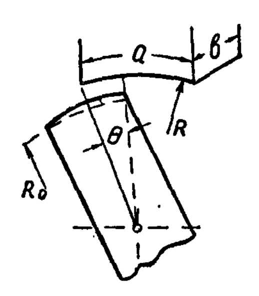
1 — без учета изменения F_p и действия краевого потока; 2 — экспериментальная.

9-4. СИСТЕМЫ С ВЫСТУПАЮЩИМ ЯКОРЕМ

В таких системах допускается малый угол поворота. Профиль якоря может быть очерчен по окружности (фиг. 9, 5 и 9, 6) в том случае, когда требуется получить приблизительно постоянное значение момента при рабочем угле поворота (фиг. 9, 7). Если же

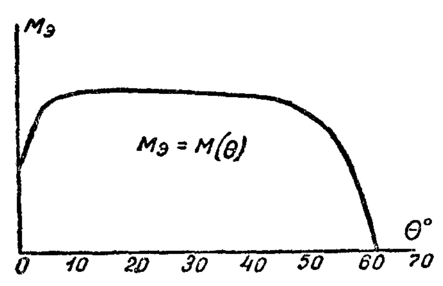


Фиг. 9, 5. Эскиз системы с выступающими полюсами.



Фиг. 9, 6. Профиль полюса и якоря.

требуется увеличение момента по ходу якоря, то профиль якоря очерчивается не по окружности, концентричной с профилем полюса, а по другой так, чтобы при втягивании якоря уменьшался воздушный зазор.



Фиг. 9, 7. Примерная кривая моментов системы с выступающими полюсами, $F = пост.$

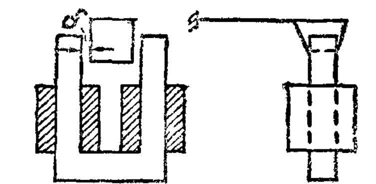
Для якоря, очерченного по окружности, концентричной с окружностью полюса, с учетом двух последовательно включенных зазоров

$$G_p = 0{,}25\mu_0 b \int_0^\theta \frac{R + R_0}{R - R_0} d\theta;$$

$$\frac{dG_p}{d\theta} = 0{,}25\mu_0 b \frac{R + R_0}{R - R_0}. \quad (9\text{-}8)$$

9-5. СИСТЕМЫ СО ВТЯЖНЫМ ЯКОРЕМ

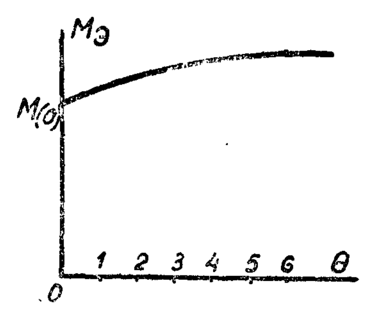
В таких системах якорь подвешивается на пружине (фиг. 9, 8). Рабочий угол поворота якоря должен быть взят таким, чтобы якорь не занимал крайних положений против полюса. Профиль якоря выбирается в зависимости от требуемой характеристики.



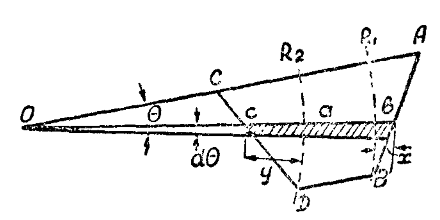
Фиг. 9, 8. Эскиз системы со втяжным якорем.

На фигуре 9, 9 приведена примерная кривая моментов для электромагнита астатического угольного регулятора, на фигуре 9, 10 — профиль якоря. Если якорь не занимает крайних положений, то можно не учитывать составляющей момента, определяемой изменением проводимости краевого поля.

Профиль якоря выполняется так: линия AB принимается прямой; закон изменения кривой CD определяется из требуемого закона изменения момента. На заданной по условиям работы регулятора кривой моментов устанавливают значения M_0, M_1 и т. д.



Фиг. 9, 9. Примерная кривая моментов системы со втяжным якорем, $F = пост.$



Фиг. 9, 10. Примерный профиль якоря.

Рассмотрим элементарную трубку поля между якорем и полюсом, площадкой dS и зазором 2δ. Площадка dS может быть разбита на три части:

a — определяемую радиусами R_1 и R_2;

b — определяемую радиусом R_1 и линией AB;

c — определяемую радиусом R_2 и кривой cD;

$$dG_1 = \mu_0 \frac{dS_1}{2\delta}; \quad dS_1 = dS_a + dS_b + dS_c;$$

$$dS_1 = \left| \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} \right| d\theta + R_1 x_1 d\theta + R_2 y_1 d\theta;$$

$$\frac{dG_1}{d\theta} = 0{,}5 \frac{\mu_0}{\delta} \left(\frac{R_1^2}{2} - \frac{R_2^2}{2} + R_1 x_1 + R_2 y_1 \right). \qquad (9\text{-}9)$$

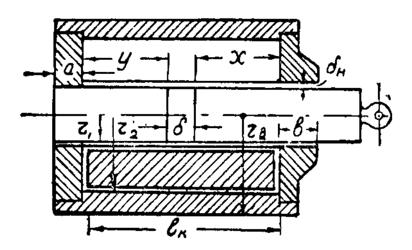
При заданном значении x_1 определяют y_1.

ГЛАВА 10

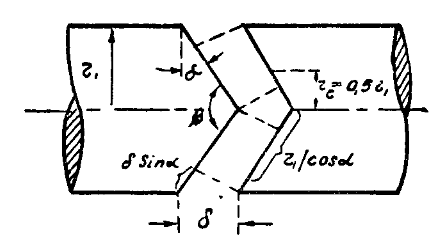
ПРЯМОХОДОВЫЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

10-1. ФОРМЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Прямоходовые системы постоянного тока исполняются, как правило, в виде соленоидов. Поэтому такие системы часто называют соленоидными. В устарелых конструкциях автоматических регуляторов соленоидные системы выполнялись с открытым магнитопроводом. Практическое значение имеют в настоящее время



Фиг. 10, 1. Прямоходовая система. Плоский стоп.



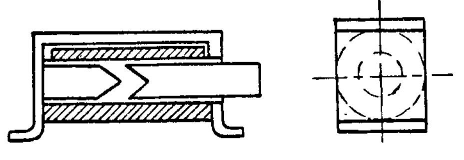
Фиг. 10, 2. Коннческий стоп.

системы с замкнутым магнитопроводом. По своему назначению прямоходовые системы могут быть разбиты на две основные группы.

а) **Короткоходовые системы** — предусматриваются для получения больших значений сил при относительно малом ходе якоря. Такие системы применяются при больших значениях конструктивного фактора $\frac{\sqrt{Q}}{\delta}$ в пределах 4—90. Короткоходовые системы всегда снабжаются стопом. На фигуре 10, 1 приведен эскиз системы с плоским стопом, на фигуре 10, 2 показано исполнение конического стопа.

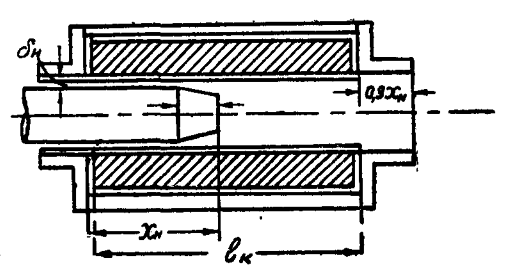
Для исполнения реле небольших габаритов применяются упрощенные формы систем, изображенных на фигуре 10, 3.

б) Длинноходовые системы — предусматриваются для получения относительно больших ходов (фиг. 10, 4). Такие системы применяются при малых значениях конструктивного фактора. В длинноходовых системах сила на якоре определяется взаимодействием потока утечки с током в катушке: $Q = clB$. Поэтому в таких системах возможно получить любое желательное значение силы при повышении значения тока в катушке (индукция достигает своего максимального значения при насыщении). Это свойство системы используется в установках, работающих при режиме кратковременной нагрузки, когда можно пропускать через катушку ток большой силы без опасения перегрева сверх допустимой по нормам температуры.



Фиг. 10, 3. Прямоходовая система упрощенного вида.

Другая особенность рассматриваемой системы: в определенной части хода якоря соленоидная сила является постоянной и не зависит от расстояния между входящим концом якоря и передним краем катушки. Поэтому можно выполнить соленоидную систему с любой величиной хода якоря, удлиняя соответственно катушку. Так, имеются исполнения длинноходовых соленоидных систем с величиной хода до 200 *мм*. Такая величина хода недостижима в системах поворотного типа. Значение хода якоря в длинноходовых системах бывает порядка $0{,}2 \div 0{,}6\, l_k$.



Фиг. 10, 4. Длинноходовая система постоянного тока.

10-2. СИЛЫ НА ЯКОРЕ

В короткоходовых системах учитывается только сила притяжения двух поверхностей — якоря и стопа. Соленоидная сила в таких системах относительно мала и ею пренебрегают.

Исходное уравнение для вычисления сил на якоре

$$Q = 5{,}1 F_p^2 \frac{dG_в}{d\delta}, \qquad (6\text{-}15)$$

где F_p — н. с. катушки за вычетом падения магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах,

$G_в$ — проводимость рабочего зазора.

Упрощая (6-15), не учитывая влияния краевого потока, получаем формулу Максвелла, более удобную для расчетов, причем эта формула приводится к виду, в котором учитывается индукция в якоре, в конце его, у рабочего зазора.

Плоский стоп (фиг. 10, 1). Формула Максвелла

$$Q = 4{,}06 \cdot 10^8 B^2 \pi r_1^2 \ \kappa\Gamma. \tag{10-1}$$

В данном случае значения индукции в якоре B и B_p в рабочем зазоре совпадают.

Конический стоп (фиг. 10, 2). Для данного случая формулу Максвелла получаем, преобразуя (6-15). Проводимость рабочего зазора, без учета краевой:

$$G_p = \mu_0 \frac{\pi r_1^2}{\delta \cos^2 \alpha} - \mu_0 \frac{\pi \delta \sin^2 \alpha}{2}. \tag{10-2}$$

Второй член правой части (10-2) относительно мал. Поэтому примем:

$$G_p = \mu_0 \frac{\pi r_1^2}{\delta \cos^2 \alpha}. \tag{10-3}$$

Тогда

$$\frac{dG_p}{d\delta} = -\mu_0 \frac{\pi r_1^2}{\delta^2 \cos^2 \alpha}, \tag{10-4}$$

далее

$$F_p G_p = \Phi_p = B_p q_p. \tag{10-5}$$

Из (10-3), (10-4), (10-5) и (6-15) имеем

$$Q = \frac{5{,}1 \cdot 10^8 B_p^2 \cdot q_p^2 \cos^2 \alpha.}{\mu_0 \pi r_1^2}. \tag{10-6}$$

Приведем (10-6) к индукции B в якоре. Поток в якоре, у рабочего зазора, равен потоку рабочего зазора

$$\Phi = \Phi_p = B_p q_p = B \pi r_1^2. \tag{10-7}$$

Из (10-6) и (10-7) имеем

$$Q = 4{,}06 \cdot 10^8 B^2 \pi r_1^2 \cos^2 \alpha. \tag{10-8}$$

10-3. ВЫБОР ФОРМЫ И ДЛИНЫ СТОПА

Форма стопа. Выбор формы стопа определяется значением конструктивного фактора для данного устройства. При большом значении к. ф., т. е. при больших значениях сил и малых — хода, рациональнее применять плоский стоп, при больших значениях хода — конический.

Практические данные: плоский стоп применяется при значении к. ф. в пределах 16 ÷ 90, конический стоп с углом $\alpha = 45°$ при к. ф. = 4 ÷ 16; с углом $\alpha = 60°$ при к. ф. = 1,85 ÷ 4.

Длина стопа. Короткоходовые системы всегда снабжаются стопом, так как по условиям конструкции длина катушки системы в несколько раз больше величины рабочего зазора δ (фиг. 10,1). В рационально исполненных системах $\delta = 0{,}05 - 0{,}1\, l_k$ и в редких случаях, в маломощных системах, $\delta = 0{,}12 \div 0{,}15\, l_k$. Начальное значение $x_н$ — величины вхождения якоря в катушку, принимается порядка $l_к/3$. Таким образом, длина стопа y получается в пределах

$$y = l_k - \frac{l_k}{3} - (0{,}05 \div 0{,}1)\, l_k. \qquad (10\text{-}9)$$

10-4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ КОРОТКОХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исходными являются следующие данные: рабочее напряжение U, рабочий ход δ, начальная сила на якоре $Q_н$, режим работы катушки — длительный, повторно-кратковременный.

При проведении предварительного расчета не учитывают соленоидной силы, а принимают во внимание только силу притяжения якоря к стопу.

Некоторыми значениями параметров, определяющих собой габариты системы, приходится задаваться: индукцией B в якоре рабочего зазора, падением магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах — $\sum H_i l_i$, температурой превышения катушки, отношением длины намотки к толщине ее. Правильный выбор указанных параметров определяет экономичность конструкции.

Индукция B. Значение B выбирается в зависимости от конструктивного фактора и от режима работы катушки: чем больше значение к. ф., тем большее значение B (см. кривые фиг. 5, 5), при кратковременном режиме работы принимают бóльшее значение, чем при длительном.

Падение магнитного потенциала в стали и нерабочих зазорах. В рационально построенных конструкциях падение магнитного потенциала в стали магнитопровода составляет при начальном положении якоря 10—20% от величины н. с. катушки, а в нерабочих зазорах — 5—10%.

Следовательно,

$$F_н + F_с = (0{,}15 \div 0{,}3)\, F.$$

Обычно принимают значение индукции в стали кожуха равным 80% индукции в якоре.

Нерабочий зазор $\delta_н$ (фиг. 10, 1) определяется толщиной латунной направляющей трубки (порядка 0,5 *мм*) и зазором между трубкой и якорем. Этот зазор принимают порядка 0,125 *мм* для случая, когда внутренняя поверхность трубки не обработана, и 0,05 *мм* для трубки с внутренней обработанной поверхностью.

Для уменьшения магнитного сопротивления нерабочего зазора рекомендуется увеличивать размеры a и b (фиг. 10, 1).

Отношение $k = \frac{l_k}{h_k}$ бывает в пределах $5 \div 8$ и выбирается также в зависимости от значения к. ф. (фиг. 5, 5). Толщина намотки h принимается из условия $m = \frac{r_2}{r_1} = 2 \div 2{,}5$, тогда

$$h = r_1 (m - 1) \qquad (10\text{-}10).$$

Схема расчета.

1) Уравнение силы.

$$Q = 4{,}06 \cdot 10^8 B^2 \pi r_1^2 \; кГ \qquad (10\text{-}8)$$

При заданном значении Q и выбранном значении B определяют радиус якоря r_1.

2) Уравнение магнитной цепи.

$$F = F_p + F_c + F_н = \frac{B\delta}{\mu_0} + (0{,}15 \div 0{,}3) F \qquad (10\text{-}11)$$

Полученное значение н. с. катушки должно иметь место при напряжении $U = 0{,}85 U_н$.

Полное значение н. с. катушки, которое надо учитывать при расчетах теплового режима, получается равным $\frac{F}{0{,}85}$.

3) *Уравнение нагрева.* Для круглых катушек

$$\theta = \rho_{20} \frac{(F/0{,}85)^2}{20 f_к \mu h_к l_к^2}. \qquad (10\text{-}12)$$

Из (10-12) определяют $l_к$ и $h_к$. Для этого требуется принять значения θ, $\frac{l_к}{h_к}$, $f_к$ — порядка 0,5. По принятому значению θ определяют ρ и μ (см. главу 2), значение F — из (10-11). Из вычисленного значения $h_к$ определяют радиус кожуха $r_2 = h_к + r_1$; из $l_к$ определяют величину y (10-9). Значение $x_н$ принимается равным $\frac{l_к}{3}$.

4) Уравнение электрической цепи:

$$U = Ir = I\rho \frac{l_{ср}}{q} w = \frac{4\rho (r_1 + r_2)}{d^2} Iw \, 10^{-3}, \qquad (10\text{-}13)$$

Iw — соответствует полному значению н. с. катушки. Из (10-13) определяется диаметр проволоки намотки, а затем вычисляется число витков катушки.

10-5. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОРОТКОХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На основании данных предварительного расчета устанавливаются основные размеры системы. Задачей проверочного расчета является уточнение параметров системы, проверка системы в отношении оптимального решения, построение тяговой характеристики.

После уточнения данных системы иногда приходится проводить расчет варианта с измененными параметрами. Число пересчетов,

необходимых для получения удовлетворительных результатов, зависит от того, насколько удачно выбраны в предварительном расчете значения параметров.

Схема расчета. 1) Уточняют данные катушки — коэффициент заполнения f_k, число витков w, сопротивление обмотки, температуру превышения.

2) Проводят расчет магнитной цепи. Для этого вычисляют проводимости всех путей в воздухе, определяют коэффициенты рассеяния и строят кривую намагничивания

$$\Phi_в = f(F_c + F_н).$$

3) Пользуясь кривой намагничивания, устанавливают рациональность принятых данных, дают им принятые значения. Оптимальное решение задачи см. в параграфе 5-7. Если полученное решение не дает удовлетворительных результатов, меняют значение индукции B в стали y рабочего зазора, что влечет за собой изменение площади сечения якоря, меняют также размеры немагнитных зазоров. В некоторых случаях приходится проверять вопрос о рациональности принятой формы стопа — плоской или конической.

4) После полного уточнения всех данных системы строится тяговая характеристика по нескольким характерным точкам, например начальной, промежуточной и конечной. При этом, ввиду изменения по ходу якоря коэффициента рассеяния, приходится строить несколько кривых намагничивания.

При вычислении сил учитывают:

Силу Q_1 — притяжения якоря к стопу

$$Q_1 = 5{,}1\, F_p^2 \frac{dG_в}{d\delta},$$

где $\frac{dG_в}{d\delta}$ — производная проводимости с учетом изменения как рабочего, так и краевого поля;

F_p — определяется из кривой намагничивания.

Силу Q_2 — соленоидную определяют из соотношения

$$Q_2 = 10{,}2 H \Phi_y, \qquad (6\text{-}25)$$

где

$$H = \frac{Iw}{l_к}.$$

При вычислении Φ_y необходимо учитывать смещение нейтрали (фиг. 3, 16), которая приближается к рабочему зазору по мере уменьшения последнего. В результате с уменьшением δ резко падает значение потока $\Phi_y = \Phi_{y1} - \Phi_{y11}$, а следовательно, и значение соленоидной силы. Характеристика соленоидной силы имеет вид кривой с максимумом, соответствующим определенной величине вхождения якоря в катушку. Величиной Q_2 при ходе якоря $\delta < 0{,}1 l_к$ практически можно пренебречь.

10-6. РАСЧЕТ ДЛИННОХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Общие соображения. Сила на якоре в длинноходовых системах возникает в результате взаимодействия потоков Φ_y с токами в катушке. Катушка в таких системах получается длинной. Поэтому каркасом для нее принимают необходимую для направления движения якоря латунную трубку с боковыми стальными фланцами (фиг. 10, 4). Входящий конец якоря обычно выполняют суживающимся, с углом сужения порядка 8—9°, максимальная длина суженной части принимается порядка $\frac{x_н}{3}$.

Исходные данные: рабочее напряжение U, рабочий ход x_p, начальная сила на якоре $Q_н$, режим работы катушки.

Принимаемые величины:

1) Индукция B в начальном положении якоря — у перехода от флянца к якорю — принимается высокой — порядка 90% индукции насыщения материала.

2) Значение падения магнитного потенциала в стали и нерабочем зазоре принимают в предварительном расчете, исходя из следующих соображений.

Падение магнитного потенциала в нерабочем зазоре принимается порядка 10% от н. с., требуемой для проведения потока Φ_y, т. е. $F_н = 0{,}1F_y$. Для вычисления падения магнитного потенциала в стали находят по кривой намагничивания материала для заданной индукции B значение H_c. Учитывая, что индукция в начале якоря равна B, а в конце $B=0$, можно считать

$$F_{c1} = \frac{H_c x}{2}.$$

Потери в наружном ярме принимают равными 60% потерь в якоре, так как индукция в ярме обычно меньше индукции в якоре.

Следовательно,

$$F_c = \frac{H_c x}{2} + 0{,}6\frac{H_c x}{2} = 0{,}8H_c x.$$

3) Намагничивающая сила для потока утечки (с учетом только воздушных путей)

$$F_{yв} = \frac{\Phi_y}{G_{yп}} = B\pi r_1^2 \frac{2(r_2 - r_1)\cdot 2}{\mu_0\pi(r_1 + r_2)x} = \frac{4Br_1^2(r_2 - r_1)}{\mu_0(r_2 + r_1)x}.$$

Полная н. с. для потока утечки

$$F_y = \frac{Iwx}{y} = 8{,}8\frac{Br_1^2(r_2 - r_1)}{x\mu_0(r_2 + r_1)} + 0{,}8H_c x. \qquad (10\text{-}14)$$

4) Толщина намотки

$$h = r_2 - r_1, \text{ причем } m = \frac{r_2}{r_1} = 2 \div 2{,}5.$$

Соотношения для расчета.

1. Уравнение силы. Уравнение $Q_2 = 10{,}2H\Phi_y$ (6-25) преобразуем к виду, более удобному для проведения предварительных расчетов. Если r_1 — радиус якоря, B — индукция в якоре в начальном его положении, то

$$B = \frac{\Phi_y}{\pi r_1^2}. \qquad (10\text{-}15)$$

Далее

$$H = \frac{Iw}{l_к}. \qquad (10\text{-}16)$$

Следует дополнительно учесть уменьшение силы за счет потерь магнитной энергии, затрачиваемой на намагничивание входящей в магнитную систему части якоря. Это снижение силы учитывается определенным коэффициентом k. Значение k для сталей хорошего качества получается порядка 0,85. Таким образом, уравнение (6-25) получается в виде

$$Q_2 = 10{,}2 \cdot 0{,}85 \frac{Iw}{l_к} B\pi r_1^2 = 27{,}2 \frac{Iw}{l_к} Br_1^2. \qquad (10\text{-}17)$$

2. Уравнение нагрева. Из (10-12), учитывая $h = r_2 - r_1$,

$$\theta = \rho \frac{(F/0{,}85)^2}{20\mu f_к (r_2 - r_1) l_к^2}. \qquad (10\text{-}18)$$

3. Уравнение электрической цепи.

$$U = \frac{4\rho (r_1 + r_2)}{d^2} F \cdot 10^{-3}. \qquad (10\text{-}13)$$

Схема предварительного расчета.

1. Вычисление r_1. Из (10-17) и (10-18) имеем

$$\frac{Iw}{l_к} = \frac{Q_2}{27{,}2 Br_1^2}; \quad \frac{Iw}{l_к} = \sqrt{\frac{20\mu f_к (r_2 - r_1) \theta\, 0{,}85^2}{\rho}}.$$

Следовательно,

$$\frac{Q_2}{27{,}2 Br_1^2} = \sqrt{\frac{20\mu f_к (r_2 - r_1) \theta\, 0{,}85^2}{\rho}}.$$

Учитывая, что

$$r_2 - r_1 = r_1 \left(\frac{r_2}{r_1} - 1\right) = r_1 (m - 1),$$

получаем

$$r_1^5 = \frac{Q_2^2 \rho}{27{,}2^2 B^2 20\mu f_к (m - 1) \theta\, 0{,}85^2}.$$

2. Вычисление $\frac{Iw}{l_к}$ *производится из выражения* (10-18).

3. Вычисление $x_н$ *производится из (10-14).*

4. Длина катушки $l_к = x_н + x_р$.

Проверочный расчет. На основании данных предварительного расчета устанавливаются основные размеры магнитной системы. Задачей проверочного расчета является уточнение параметров и введение изменений в величинах этих параметров в том случае, если принятые значения не привели к удовлетворительным результатам. Расчет производится по приведенным ранее соотношениям.

10-7. ФОРМЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В практике получили распространение короткоходовые системы разных форм. На фигуре 10, 5 приведены наиболее ходкие из них: a — с Ш-образным якорем и ярмом; b — с Т-образным якорем и Е-образным ярмом; c, d — соленоидные. Формы a и b дают лучшее решение в отношении получения минимального веса конструкции при заданной условной работоспособности. Однако в релестроении применяют предпочтительно соленоидные системы (форма c), более удобные в конструктивном отношении. При необходимости получения больших сил на якоре применяется форма d.

Соотношение сечений. Сечение ярма принимается меньшим, чем сечение якоря и стопа. Отношение размеров a и b принимают порядка 1,5 ÷ 2.

Фиг. 10, 5. Прямоходовые системы переменного тока.

Размещение экрана. Экран располагают в месте наиболее удобном для шлифовки торцов.

Конечный зазор. Для предохранения якоря от залипания необходимо иметь конечный зазор в системе; в местах же крепления экрана зазор должен быть минимальным. В системе формы c конечным зазором является промежуток между якорем и ярмом.

10-8. СИЛЫ НА ЯКОРЕ

В магнитных системах $\phi = пост.$ поток системы определяется приложенным напряжением и числом витков катушки.

Считая $U \cong E$, получаем

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}U}{\omega w}.$$

Значение рабочего потока равно $\Phi_p = \frac{\Phi}{\sigma}$; при проведении расчета по формуле Максвелла краевой поток рабочего зазора относят к потокам рассеяния.

При вычислении сил на якоре необходимо учитывать конструктивные особенности магнитной системы.

Форма *c*. Задаваясь значением индукции B_p в рабочей части зазора, определяют силу

$$Q = 2{,}03 \cdot 10^8 B_p^2 q_1.$$

Формы *a*, *b*. Сила на якоре суммируется из сил в среднем и крайних зазорах системы. Формулу Максвелла приведем к среднему зазору

$$Q = 2{,}03 \cdot 10^8 \left[B_{p1}^2 q_1 + 2B_{p2}^2 q_2\right].$$

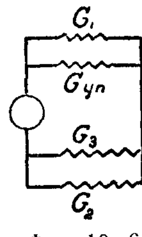
Учитывая, что

$$q_2 = \alpha q_1;\ B_{p2} = \frac{0{,}5B_{p1}}{\alpha},$$

получаем

$$Q = 2{,}03 \cdot 10^8 B_{p1}^2 q_1 \left(1 + \frac{0{,}5}{\alpha}\right). \qquad (10\text{-}19)$$

Форма *d*. Рабочими являются зазоры *1* и *2*, нерабочим — *3*. В начальном положении якоря зазор *3* в несколько раз меньше зазора *2*. Поэтому в этом положении силу считают только по зазору *1*. В последующих положениях якоря необходимо учитывать и силу у зазора *2*. При этом приходится пользоваться формулой, учитывающей силу в функции производной проводимости $\frac{dG}{d\delta}$; здесь G — полная проводимость всей системы, которая определяется на основании схемы замещения магнитной системы (фиг. 10, 6).



Фиг. 10, 6. Схема замещения.

В конечном положении якоря удобнее проводить расчет по формуле Максвелла, причем данные расчета получаются относительно точными, поскольку значение краевого потока при малых зазорах между якорем и ярмом весьма невелико.

10-9. ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При проектировании магнитной системы приходится задаваться некоторыми величинами. Рассмотрим основные величины B_p и σ.

Индукция B_p в рабочей части зазора. Ориентировочно значение B_p можно принять по величине конструктивного фактора. Соответствующие зависимости $B_p = f$(к. ф.), разработанные для систем постоянного тока, приведены на фигуре 5, 5. Для пользования этими данными при расчете систем переменного тока вводится понятие об эквивалентном конструктивном факторе. Учи-

тывая, что при одном и том же сечении площади рабочего зазора и одном и том же значении максимальной индукции сила в системе постоянного тока получается вдвое большей, чем в системе переменного тока, принимают эквивалентное значение к. ф. равным $\frac{\sqrt{2Q}}{\delta}$.

Коэффициент рассеяния σ. При весьма большом значении к. ф., характеризующемся малым значением хода δ, величина σ получается порядка 1,1. Ориентировочное значение σ при заданном к. ф. определяется следующим образом.

По кривым, изображенным на фигуре 5, 5, находят значение индукции B_{p1} для максимального значения к. ф. и B_{p2} — для заданного.

Тогда

$$\sigma = 1{,}1 \frac{B_{p1}}{B_{p2}}. \qquad (10\text{-}20)$$

Пример. Определить значение коэффициента рассеяния для проектируемой системы.

Задано: $Q = 4{,}5$ *кГ*; $\delta = 1$ *см*.

Для к. ф. = 400 значение $B_{p1} = 1{,}38 \cdot 10^{-4}$. Эквивалентное значение к. ф. проектируемой системы

$$\frac{\sqrt{2 \cdot 4{,}5}}{1} = 3; \; B_{p2} = 0{,}5 \cdot 10^{-4}.$$

$$\sigma = 1{,}1 \frac{1{,}38}{0{,}5} \cong 3.$$

10-10. РАСЧЕТ КОРОТКОХОДОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Расчет системы состоит из двух этапов: предварительного и проверочного. Рассмотрим расчет системы, приведенной на фигуре 10, 5*с*.

Заданными являются следующие величины:

$U_н$ — рабочее напряжение сети; начальная сила Q, начальный ход — δ — *см*, режим работы катушки.

а) **Предварительный расчет.** 1) Определяют значение B_p по эквивалентному к. ф. (см. кривые фиг. 5, 5).

2) Пользуясь формулой (10-20), устанавливают ориентировочное значение σ.

3) Из формулы $Q = 2{,}03 \cdot 10^8 B_p^2 q$ определяют сечение рабочего воздушного зазора.

4) Поток в системе $\Phi = B_p q \sigma$ вебер.

5) Число витков катушки определяется из условия получения требуемой силы Q при напряжении, равном $0{,}85 U_н$:

$$w = \frac{\sqrt{2} \cdot 0{,}85 U_н}{\omega B_p q \sigma}. \qquad (10\text{-}21)$$

6) Предварительные размеры системы. Сечение якоря принимается квадратным. Значение нерабочего зазора 0,05 *см*, толщина наружной части ярма принимается равной половине ширины якоря.

Величина вхождения якоря в катушку, в начальном его положении, должна быть не меньше $^1/_3$ длины катушки. Таким образом,

$$l_к > 3x.$$

Толщина намотки принимается приблизительно равной ширине якоря.

б) Проверочный расчет. При проведении проверочного расчета уточняются все данные системы.

1) Проводится расчет катушки — по вычисленному в предварительном расчете определяют диаметр проволоки, электрическое сопротивление катушки.

2) Уточняются значения коэффициентов рассеяния.

3) Уточняются значения силы в начальном положении якоря.

4) Проводится расчет экрана, применяемого для устранения вибрации (см. главу 7). Выбор значения пульсации принимается из условия, чтобы минимальное значение электромагнитной силы в конечном положении якоря было больше максимальной величины противодействующей силы.

5) Вычисляется значение тока в катушке: I_1 — при отпущенном и I_2 — при притянутом якоре (см. главу 3). При вычислении индукции в стали учитывается коэффициент заполнения пакета жестей

$$q_c = k_c q.$$

6) Определяется температура превышения (см. главу 2).

7) Вычисляется степень использования системы по кажущейся мощности

$$k_u = \frac{I_1 - I_2}{I_1}.$$

Значение k_u в рационально спроектированных магнитных системах получается порядка 0,85—0,9.

Если полученные при расчете данные не удовлетворяют заданным условиям, меняют значение индукции B_p и проводят новый вариант расчета.

ГЛАВА 11

ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

11-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ

Временем срабатывания реле считают продолжительность действия от момента подачи импульса на срабатывание до момента полного его срабатывания. Различают: 1) время срабатывания на включение, протекающее с момента включения катушки до момента замыкания нормально открытых контактов; 2) время сра-

батывания на отключение, протекающее с момента отключения катушки до момента замыкания нормально замкнутых контактов. Время t слагается из двух частей:

1) $t_н$ — времени, протекающего с момента подачи импульса на катушку (на включение ее или отключение) до момента начала движения якоря;

2) $t_д$ — времени движения якоря до полной его остановки.

По времени срабатывания различают следующие основные группы реле:

1) быстродействующие $t = 0{,}003'' \div 0{,}050''$;

2) обыкновенные $t = 0{,}050'' \div 0{,}15''$;

3) замедленно действующие $t = 0{,}25''$ и более.

Приведенная классификация условна и принята здесь из следующих соображений: при проектировании электромагнита без учета времени t получают t порядка $0{,}05'' \div 0{,}15''$, т. е. обыкновенное реле; для создания быстродействующих или замедленно действующих реле приходится применять специальные конструкции или специальные схемы включения электромагнитов. Время срабатывания электромагнита зависит от кратности k приложенного к катушке напряжения

$$k = \frac{U}{U_{ср.\ мин}}.$$

Заводские гарантийные данные по времени t относят к определенному значению k $(1{,}3 \div 3)$.

Виды замедленно действующих реле. Такие реле могут быть исполнены с различными временными характеристиками в функции тока катушки $t = f(I)$ (фиг. 11, 13):

а) зависимая характеристика; б) независимая, в которой время срабатывания не зависит от силы тока в катушке; в) ограниченно зависимая, в которой начальная часть является зависимой и далее переходит в независимую.

Методы получения замедленного действия. Существует два основных метода.

Увеличивают составляющую $t_н$ за счет увеличения постоянной времени контура или посредством специальных схем. Назовем эту группу реле с магнитным демпфированием.

Увеличивают составляющую $t_д$, для чего применяют различные виды торможения: масляные или воздушные демпферы, ветрянки и другие. Назовем эту группу реле с механическим демпфированием.

В обеих группах реле время t на срабатывание отличается от времени на отпуск; в реле с магнитным демпфированием, как правило, стремятся увеличить t на отпуск, а в реле с механическим демпфированием — на срабатывание.

11-2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ $t_н$ НА ВКЛЮЧЕНИЕ

Время $t_н$ определяется, в основном, величиной постоянной времени T магнитной системы. Это положение справедливо для цепей постоянного тока. В цепях переменного тока закон нарастания тока при включении индуктивной катушки на напряжение $U = U_м \sin \omega t$ в момент, характеризуемый фазой ψ:

$$i = I_м\left[\sin(\omega t + \varphi + \psi) - \sin(\psi - \varphi)\, e^{-\frac{t}{T}}\right].$$

Таким образом, время нарастания тока определяется в данном случае в основном фазой ψ, и амплитудное значение $I_м$ достигается максимум за время порядка четверти периода. Поэтому учет времени $t_н$ производится только для систем постоянного тока с катушкой параллельного включения. В системах с катушкой последовательного включения закон нарастания тока определяется параметрами силовой цепи, а не реле. Ниже рассматривается несколько схем включения катушек и показываются способы вычисления времени.

а) **Обычное включение катушки.** Закон нарастания тока

$$i = I\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \tag{11-1}$$

При расчете реле устанавливают значения:

$I = \frac{U}{r}$; i — ток срабатывания реле; T — постоянная времени электромагнита; при наличии воздушных зазоров в магнитной системе индуктивность L определяется практически только магнитным сопротивлением воздушных зазоров. Тогда

$$T = \frac{L}{r} = \frac{w^2 G}{r} \text{ генри,}$$

где G — полная проводимость всех путей потока по воздуху.

Из (11-1) получаем

$$t_н = T \ln \frac{I}{I - i} \text{ сек.} \tag{11-2}$$

Уменьшение $t_н$ достигается введением добавочного сопротивления r_1 последовательно с катушкой реле.

Тогда

$$T = \frac{L}{r + r_1}.$$

Пример. Требуется определить время $t_н$ на включение.

Данные электромагнита: $I = 0{,}08$ *а*; $i = 0{,}06$ *а*; $r = 1000$ *ом*, $w = 10^4$; $G = 33 \cdot 10^{-8}$.

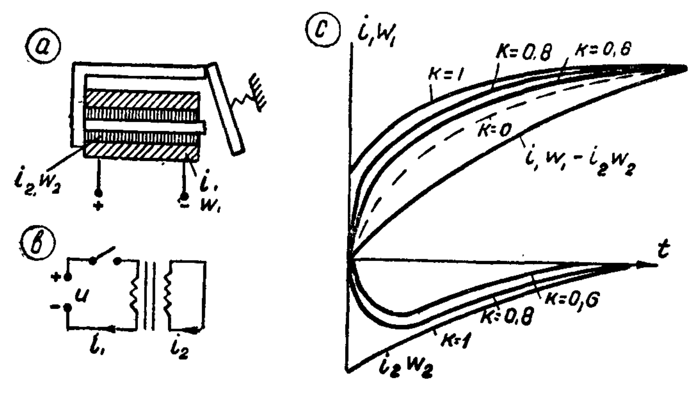
$$t_н = \frac{10^8 \cdot 33 \cdot 10^{-8}}{1000} \ln \frac{0{,}08}{0{,}08 - 0{,}06} = 45{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

б) Применение электромагнитного демпфера. Схема устройства и кривые приведены на фигуре 11, 1. Катушка *1* с числом витков w_1 включается на напряжение сети, катушка *2* с числом витков w_2 замкнута накоротко.

Мгновенные значения токов i_1 и i_2 определяются из следующих дифференциальных уравнений:

$$r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = U; \qquad (11\text{-}3)$$

$$r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0. \qquad (11\text{-}4)$$



Фиг. 11, 1. Система с магнитным демпфером:
a — эскиз; *b* — схема замещения; *c* — кривые $F = F(t)$.

Взаимоиндуктивность $M = k\sqrt{L_1 L_2}$, где k — коэффициент электромагнитной связи. Для крайних случаев:

отсутствие электромагнитной связи $k = 0$, $M = 0$;

полная связь — $k = 1$, $M = \sqrt{L_1 L_2}$.

При концентричной посадке обеих катушек — рабочей и демпферной $k = 0{,}95$, при раздельной посадке на общем сердечнике $k = 0{,}85 \div 0{,}9$. Полное значение н. с. системы

$$F = i_1 w_1 - i_2 w_2 = w_1 \left(i_1 - i_2 \frac{w_2}{w_1} \right).$$

Решение уравнений (11-3) и (11-4) приводится в учебниках теоретической электротехники и имеют следующий вид:

$$i_1 = I_{10} + I_{11} e^{p_1 t} + I_{12} e^{p_2 t}; \qquad (11\text{-}5)$$

$$i_2 = I_{21} e^{p_1 t} + I_{22} e^{p_2 t}, \qquad (11\text{-}6)$$

где p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения.

Закон протекания токов i_1 и i_2 зависит от значения коэффициента электромагнитной связи k и постоянных времени T_1 и T_2. При $k = 0$, $i_2 = 0$ — получается экспоненциальная кривая тока при отсутствии демпфера (см. пунктир).

Время $t_{н2}$ для получения требуемого значения тока срабатывания получается при наличии демпфера больше, чем $t_{н1}$ без демпфера.

В формулах (11-5) и (11-6) выражения для p_1 и p_2 имеют весьма громоздкий вид, вследствие чего теряется возможность анализа с целью установления влияния отдельных параметров на время $t_н$. Для практических расчетов можно пользоваться упрощенным методом, рассматривая кривую $i_1 - i_2 \frac{w_2}{w_1}$ как экспоненту с постоянной времени

$$T_n = T_1 + T_2 = \frac{w_1^2 G}{r_1} + k \frac{w_2^2 G}{r_2}. \quad (11\text{-}7)$$

Определив требуемое значение тока i_c — срабатывания, вычисляют

$$t_н = T_n \ln \frac{I}{I - i_c}. \quad (11\text{-}8)$$

Вихревые токи, индуктируемые в переходном процессе в стали магнитопровода, оказывают влияние на закон нарастания и убывания тока в катушке. Это влияние заметно сказывается при наличии массивных магнитопроводов, выполненных из стали с относительно малым удельным сопротивлением. Учет влияния стали производится в расчетах в виде постоянной времени T_c: сталь магнитопровода рассматривается как короткозамкнутая катушка с одним витком (см. ниже). Таким образом, в общем виде приведенная постоянная времени T_n магнитной системы состоит из трех составляющих:

$$T_n = T_1 + T_2 + T_c. \quad (11\text{-}9)$$

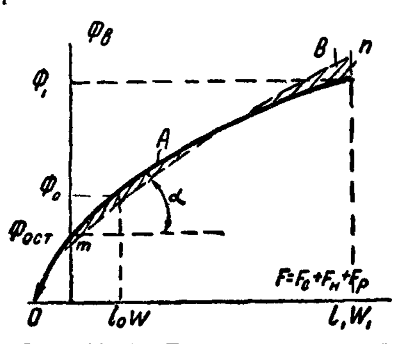
11-3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ $t_н$ НА ОТКЛЮЧЕНИЕ

Общие положения. При отключении катушки электромагнита ток исчезает практически мгновенно, так как длительность дуги на контактах отключающего устройства весьма мала. Поток в магнитопроводе также резко снижается до значения остаточного потока. В таких случаях время $t_н$ на отключение практически не учитывают.

В том случае, если магнитопровод выполнен массивным, магнитная энергия системы при отключении катушки сохраняется в первый момент и затрачивается затем на джоулево тепло, определяемое вихревыми токами, индуктируемыми в стали. Закон убывания вихревых токов определяется постоянной времени T_c. Поток спадает не мгновенно, а меняется в соответствии с изменением $F = i_2 w_2$, определяемой вторичными токами. В рассматриваемой системе приходится учитывать величину $t_н$ на отключение. Аналогичная картина получается при наличии в системе демпфирующей катушки.

Для увеличения $t_н$ применяют также специальные схемы: шунтируют рабочую катушку электрическим сопротивлением, емкостью или выпрямительным вентилем. При применении таких схем магнитная энергия системы переходит после момента отключения катушки от сети в джоулево тепло, определяемое токами в катушке; намагничивающая сила определяется током i_1: $F = i_1 w_1$.

Зависимость $\Phi = f(F)$ нелинейная. Поэтому задачу вычисления $t_н$ решают графически или аналитически, с линеаризацией кривой размагничивания.



Фиг. 11, 2. Линеаризация кривой размагничивания.

Фиг. 11, 3. Дробная линеаризация кривой.

Данные для расчета. Время $t_н$ на отключение определяется временем спадания потока от величины Φ_1 — потока в рабочем зазоре при притянутом якоре, до Φ_0 — потока отпуска, при котором электромагнитная сила $Q_э$ становится меньше противодействующей, механической силы $Q_п$.

При проведении расчета требуется строить кривую размагничивания системы (фиг. 11, 2)

$$\Phi = f(F_c + F_н + F_р).$$

Полному значению н. с., получающемуся при напряжении $U_н$, соответствует поток Φ_1; току отпуска i_0 — поток Φ_0; значение остаточного потока в системе — $\Phi_{ост}$.

Для аналитического решения задачи линеаризируют кривую размагничивания, для чего проводят прямую mn так, чтобы площадка A была равна площадке B.

Уравнение кривой размагничивания в этом случае:

$$\Phi = \Phi_{ост} + iw \operatorname{tg} \alpha. \tag{11-9}$$

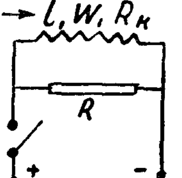
Для насыщенных систем применяют дробную линеаризацию (фиг. 11, 3).

Значение Φ_0 определяется из условия

$$Q_э = Q_п = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_0^2}{q} \ (10—10); \ \Phi_0 = \sqrt{\frac{qQ_п}{4{,}06 \cdot 10^8}}. \tag{11-11}$$

Величина $Q_п$ может быть регулируема изменением натяжения пружины.

Время $t_н$ при наличии шунтирующего сопротивления. При отключении катушки от сети ток катушки продолжает циркулировать в контуре: катушка — сопротивление R (фиг. 11, 4).



Фиг. 11, 4. Схема шунтирования рабочей катушки.

Исходное уравнение

$$i(R_к + R) + w\frac{d\Phi}{dt} = 0. \qquad (11\text{-}12)$$

Интегрируя (11-12), получаем

$$t_н = \frac{w}{R_к + R}\int_{\Phi_0}^{\Phi_1}\frac{d\Phi}{i}. \qquad (11\text{-}13)$$

Для удобства расчета уравнение (11-13) преобразуем так:

$$t_н = \frac{w^2}{R_к + R}\int_{\Phi_0}^{\Phi}\frac{d\Phi}{iw}. \qquad (11\text{-}14)$$

Из (11-9)

$$d\Phi = \operatorname{tg}\alpha\, d(iw) \qquad (11\text{-}15)$$

Из (11-14) и (11-15)

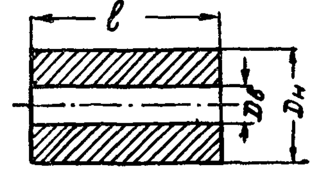
$$t_н = \frac{w^2}{R_к + R}\operatorname{tg}\alpha\int_{i_0 w}^{i_1 w}\frac{d(iw)}{iw},$$

или

$$t_н = \frac{w^2}{R_к + R}\operatorname{tg}\alpha\ln\frac{i_1}{i_0}. \qquad (11\text{-}16)$$

Изменяя натяжение пружины, т. е., меняя значение $Q_п$, а вместе с тем Φ_0 и i_0, получают различные значения $t_н$. Это время может быть изменено регулированием величины шунтирующего сопротивления.

Время $t_н$ при наличии магнитного демпфера. Магнитный демпфер может быть выполнен в виде короткозамкнутой катушки. Практически демпфер выполняют в виде гильзы, насаженной на сердечник. Число витков демпфера $w_д = 1$ (фиг. 11, 5); электрическое сопротивление



Фиг. 11, 5. Магнитный демпфер.

$$r = \rho\pi\frac{D_н + D_в}{D_н - D_в}10^{-3}. \qquad (11\text{-}17)$$

В момент отключения рабочей катушки от сети в демпфере индуктируется ток, величина которого зависит от значения коэффициента электромагнитной связи k.

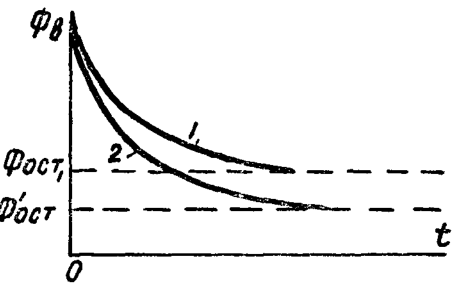
Если принять $w_д = 1$, то

$$i_д = kiw. \qquad (11\text{-}18)$$

Время $t_н$ может быть вычислено из (11-16) подстановкой данных демпфера:

$$t_н = \frac{1}{r} \operatorname{tg} \alpha \ln \frac{ki_1}{i_0}. \qquad (11\text{-}19)$$

Строится кривая зависимости $t_н$ от Φ_0 (фиг. 11,6). При $\Phi_0 = \Phi_{ост}$ время $t_н$ становится равным бесконечности, что соответствует залипанию якоря. Учитывая различные отклонения от расчетных данных, получающиеся при изготовлении реле, принимают при расчетах коэффициент запаса порядка $1{,}3 \div 1{,}4$, т. е. максимальное расчетное время $t_н$ принимают из условия $\Phi_0 = 1{,}3 \div 1{,}4\, \Phi_{ост}$.



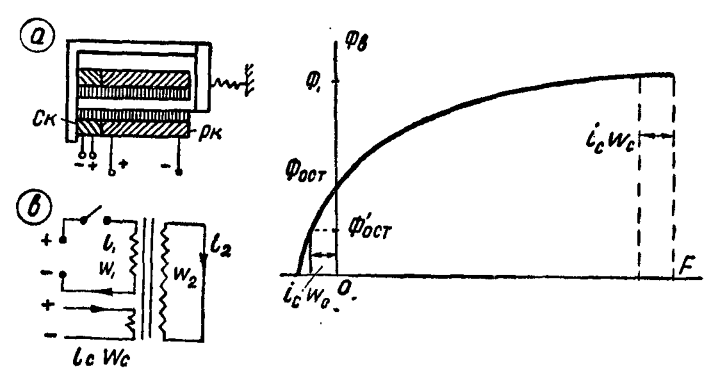
Фиг. 11, 6. Кривые $t = f(\Phi)$:
1 — без ссаживающей катушки; 2 — со ссаживающей катушкой.

В формуле (11-19) не учитывается влияние вихревых токов, индуктируемых в момент отключения катушки в стали магнитопровода. Эти токи несколько увеличивают время $t_н$.

Как указывалось выше, для расчета сильно насыщенных систем рационально применить дробную линеаризацию. В данном случае

$$t_н = \frac{1}{r}\left(\operatorname{tg} \alpha_1 \ln \frac{i_n}{i_0} + \operatorname{tg} \alpha_2 \ln \frac{ki_1}{i_n}\right). \qquad (11\text{-}20)$$

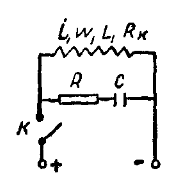
Система с магнитным демпфером и ссаживающей катушкой. Для увеличения $t_н$ магнитную систему снабжают, помимо демпфера, еще дополнительной катушкой, включаемой так, что н. с. этой катушки действует против рабочей (фиг. 11, 7*а*).



Фиг. 11, 7. Система с демпфером и ссаживающей катушкой.

Такие катушки называют ссаживающими. Действие ссаживающей катушки поясняется кривой, изображенной на фигуре 11,7: в насыщенной системе при наличии отрицательной н. с., $i_c w_c$ — ссаживающей катушки, величина потока Φ_1 при токе i_1 уменьшается незначительно; значительно влияние $i_c w_c$ на величину остаточного потока, который снижается от $\Phi_{ост}$ до $\Phi'_{ост}$. Благодаря этому можно снижать величину Φ_0 до $1{,}3 \div 1{,}4\,\Phi'_{ост}$, что позволяет увеличивать время $t_н$ ослаблением пружины. Сравнительные характеристики: кривые $t = f(\Phi)$ приведены на фигуре 11, 6.

Шунтирование катушки емкостью. В практике встречаются схемы, где катушка электромагнита шунтируется емкостью (фиг. 11, 8). Последовательно с емкостью рекомендуется ставить электрическое сопротивление R, назначение которого: 1) уменьшать величину зарядного тока при включении контакта K; 2) устранять возможность возникновения колебательных процессов в момент отключения контакта K. Назначение шунтирующего контура — изменить время $t_н$ на отпуск.



Фиг. 11, 8. Схема шунтирования катушки емкостью.

В зависимости от соотношения параметров цепи $L_к - (R + R_к) - C$ получается колебательный или апериодический процесс затухания тока катушки. В системах с массивным магнитопроводом, где из-за вихревых токов, индуктируемых в стали, получается значительное время $t_н$, подбирают параметры контура так, чтобы получился колебательный процесс, что приводит к уменьшению времени $t_н$.

В других случаях, где требуется увеличение $t_н$ на отпуск, подбирают параметры контура для получения апериодического процесса.

Уравнение переходного процесса

$$i(R_к + R) + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{c}\int i\,dt = 0. \qquad (11\text{-}21)$$

Метод определения L см. в главе 3.

Дифференцируя (11-21) по t, имеем

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + (R_к + R)\frac{di}{dt} + \frac{i}{c} = 0. \qquad (11\text{-}22)$$

Характеристическое уравнение

$$LP^2 + (R_к + R)P + \frac{1}{c} = 0;$$

$$P_{1,2} = -\frac{R_к + R}{2L} \pm \frac{2}{2L}\sqrt{(R_к + R)^2 - \frac{4L^2}{c}}. \qquad (11\text{-}23)$$

Переходный процесс зависит от параметров цепи. Рассмотрим два случая:

1) $(R_к + R)^2 - \frac{4L^2}{c} > 0.$

Обозначим

$$\frac{R_к + R}{2L} = \sigma; \quad \frac{1}{2L}\sqrt{(R_к + R)^2 - \frac{4L^2}{c}} = \rho,$$

тогда

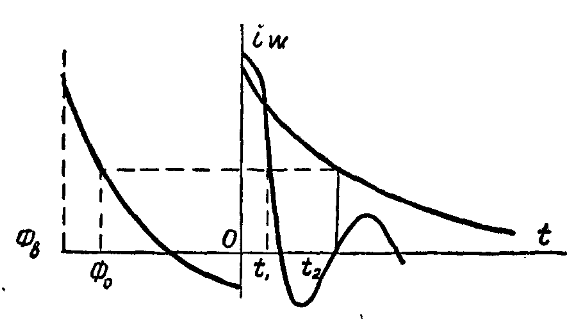
$$P_1 = -\sigma + \rho; \quad P_2 = -\sigma - \rho.$$

$$i = e^{-\sigma t}\{A_1 e^{\rho t} + A_2 e^{-\rho t}\}. \qquad (11\text{-}24)$$

Получается апериодический процесс (фиг. 11, 9). Постоянные A_1 и A_2 определяют из начальных условий.

2) $(R_к + R)^2 - \frac{4L^2}{c} < 0; \quad P_1 = -\sigma + j\rho; \quad P_2 = -\sigma - j\rho;$

$$i = e^{\sigma t}\{A_1 e^{j\rho t} + A_2 e^{-j\rho t}\}. \qquad (11\text{-}24a)$$



Фиг. 11, 9. График для вычисления времени.

Получается колебательный процесс (фиг. 11, 9). При вычислении $t_н$ необходимо построить кривую $iw = f(t)$. На этом же графике строится кривая размагничивания, соответствующая замкнутому состоянию магнитной системы (фиг. 11, 9). Вычисляется поток Φ_0 — отпуска якоря и графически определяется время $t_н$.

11-4. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ

Основные уравнения.

1) Уравнение электрического равновесия:

$$U = ir + \frac{d\psi}{dt}. \qquad (11\text{-}25)$$

В процессе движения якоря меняют свои значения как индуктивность системы L, так и ток катушки i. Поэтому

$$d\psi = Ldi + i\,dL. \qquad (a).$$

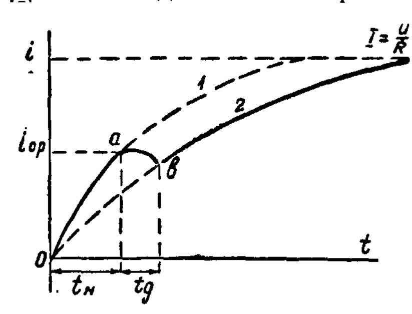
Из (11-25) и (*a*)

$$U = ir + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dx}\frac{dx}{dt} = ir + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dx}\frac{dx}{dt} \qquad (11\text{-}26)$$

Из (11-26) видно, что в процессе движения якоря возникает добавочная противодействующая э. д. с., пропорциональная ско-

рости V — движения. Поэтому значение тока в переходном процессе не только не увеличивается, как это имело бы место при неподвижном якоре, но уменьшается.

На фигуре 11, 10 приведена осциллограмма изменения тока. До начала движения якоря значение тока изменяется по экспоненте 1, с постоянной времени T_1, соответствующей разомкнутому состоянию магнитной системы.



Фиг. 11, 10. Осциллограмма тока при включении катушки.

По истечении времени $t_н$ начинается движение якоря (точка a). При этом ток катушки, несколько повышаясь вначале, падает в дальнейшем. Точке (b) кривой 2 соответствует полное время срабатывания. После остановки якоря значение тока изменяется по экспоненте 2, с постоянной времени T_2, соответствующей замкнутому состоянию магнитной системы.

2) *Уравнение механического равновесия.*

$$Q_э = Q_п + Q_и + Q_д + Q_{тр}. \qquad (11\text{-}27)$$

$$M_э = M_п + M_и + M_д + M_{тр}. \qquad (11\text{-}28)$$

Здесь $Q_п$, $M_п$ — значение силы и момента противодействующих устройств;

$Q_и$, $M_и$ — значения инерционных сил и моментов;

$Q_д$, $M_д$ — значения сил и моментов, созданных демпфирующими устройствами;

$Q_{тр}$, $M_{тр}$ — силы и моменты трения.

3) *Уравнение силы* $Q_э = 4{,}06 \cdot 10^8 \dfrac{\Phi^2}{q}$.

4) *Значение потока* $\Phi = \Phi(F)$. (11-29)

Динамическая тяговая характеристика. Тяговая характеристика, построенная без учета динамики движения якоря, называется статической. Такие характеристики рассматривались в предыдущих главах.

При учете инерционных сил движения, а также изменения силы тока в процессе движения получают динамическую характеристику. При больших скоростях движения якоря обе характеристики значительно отличаются по своим данным.

Методы расчета. Уравнения (11-26), (11-27) и (11-29) — нелинейные, вследствие чего аналитическое решение задачи не представляется возможным. Поэтому для вычисления времени $t_д$ пользуются методами графического или численного интегрирования, имеются также приближенные аналитические методы При рассмотрении указанных методов можно отметить следующее.

1) Методы численного интегрирования громоздки и при решении задачи не выявляется влияние отдельных параметров на время t_∂.

2) Приближенные аналитические методы построены на ряде допущений. Так, в этих методах не учитывается изменение падения магнитного потенциала в стали по ходу якоря, которое фактически меняется в больших пределах — от $0,1 \div 0,2F$ до $(0,6 \div 0,8)F$. Далее, значение противодействующих сил принимается постоянным по ходу якоря или же меняющимся линейно. Между тем, в конструкциях реле они меняются ступенчато. Полученные в приближенных аналитических методах соотношения также громоздки и не показывают связи между временем t_∂ и параметрами магнитной системы.

Пользуясь указанными методами, можно с некоторой точностью установить время t_∂ для готовой модели электромагнита. В заводских условиях эта задача точнее решается экспериментальным путем.

При проектировании же системы необходимо определить время t_∂, если не точно, то хотя бы порядок этого времени. Однако при этом в распоряжении конструктора должны быть простые соотношения, показывающие, как надо изменять параметры системы для получения требуемого времени t_∂. Такому условию не удовлетворяют соответствующие методы графического интегрирования и упрощенные аналитические, поэтому практическое значение их невелико.

Упрощенный графо-аналитический метод. В практике пользуются упрощенным методом с использованием статической тяговой характеристики. При применении этого метода получается ошибка порядка 30—50%, так как не учитывается влияние всех факторов динамики процесса. Однако простые соотношения, получаемые при этом методе, позволяют установить влияние основных параметров магнитной системы на время t_∂, что важно знать при проектировании. Рассмотрим два случая.

1) *Магнитная система не снабжена механическим демпфером.* В этом случае пренебрегают значениями Q_∂, а также $Q_{тр}$. Тогда (11-27) будет

$$Q_э - Q_п = Q_u.$$

Учитывая, что $Q_u = m\frac{d^2x}{dt^2}$, где m — масса подвижной системы, x — переменный ход якоря, получаем:

$$Q_э - Q_п = m\frac{d^2x}{dt^2}. \qquad (11\text{-}30)$$

Отсюда

$$t_\partial = \sqrt{\frac{2mx}{Q_э - Q_п}}. \qquad (11\text{-}31)$$

По аналогии имеем

$$t_\partial = \sqrt{\frac{2J\alpha}{M_э - M_п}}. \qquad (11\text{-}32)$$

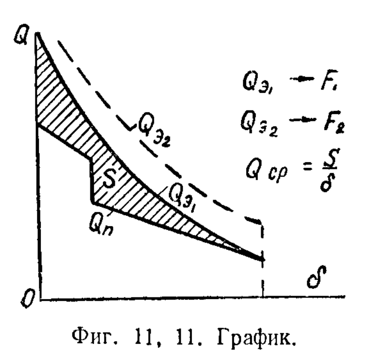
Значения $Q_э — Q_п$, а также $M_э — M_п$ принимаются как среднее по ходу якоря.

Построив механическую и электромагнитную характеристики (фиг. 11, 11), находят величину заштрихованной площадки S.

Тогда

$$Q_э — Q_п = \frac{S}{\delta}.$$

Из (11-31) и графика, приведенного на фигуре 11, 11, видно, как надо менять параметры системы: массу, ход, значение н. с. F, характер тяговой характеристики, для получения требуемого времени $t_д$.



Фиг. 11, 11. График.

2) *Магнитная система снабжена механическим демпфером.* Ускорения якоря получаются в таких системах незначительными. Поэтому принимают $Q_и = 0$. Пренебрегая также $Q_{тр}$, получаем

$$Q_э — Q_п = Q_д.$$

Демпфирующая сила пропорциональна коэффициенту демпфирования $k_д$ и скорости движения:

$$Q_д = k_д \frac{dx}{dt}; \quad Q_э — Q_п = k_д \frac{dx}{dt}; \quad t_д = k_д \frac{x}{Q_э — Q_п}. \qquad (11\text{-}33)$$

По аналогии имеем

$$t_д = k'_д \frac{\alpha}{M_э — M_п}. \qquad (11\text{-}34)$$

Формулы (11-33) и (11-34) дают относительно точное решение задачи, так как при малой скорости движения якоря статическая характеристика электромагнита незначительно отличается от динамической.

11-5. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ

К быстродействующим относят реле, время срабатывания которых получается порядка 0,003 — 0,05 *сек*, причем это время относят к определенной кратности тока катушки $1{,}3 \div 3\, I_н$. При проектировании таких реле необходимо принимать особые меры для снижения составляющих $t_н$ и $t_д$ времени срабатывания. Полное время

$$t = t_н + t_д = T \ln \frac{I}{I - i} + \sqrt{\frac{2mx}{Q_э — Q_п}}. \qquad (11\text{-}35)$$

Из (11-35) намечаются рекомендации по снижению времени $t_д$.

1) Постоянная времени T должна быть минимальной. Для этого магнитопровод выполняют не сплошным, а шихтованным,

благодаря чему уменьшается влияние вихревых токов. Катушка выполняется с минимально возможными габаритами; последовательно с катушкой иногда ставят добавочное электрическое сопротивление.

В тех случаях, когда имеется контактная система большой разрывной мощности, магнитопровод делают сдвоенным, благодаря чему постоянная T значительно уменьшается.

2) Стремятся к уменьшению тока срабатывания i_c, для этого индукцию в стали принимают незначительной, порядка (0,2 — 0,3) 10^{-4}, выбирают материал магнитопровода с большим значением магнитной проницаемости при слабой напряженности поля, например пермаллой.

3) Стремятся к увеличению значения тока I, предельная величина которого определяется тепловым режимом катушки.

4) Якорь выполняют так, чтобы он имел возможно меньшую массу. Однако чрезмерно уменьшать сечение якоря не рекомендуется, так как при этом может получаться насыщение его.

5) Величина хода якоря x, или угла его поворота α, принимается минимальной. В некоторых исполнениях $x = 0{,}2 \div 0{,}3$ *мм*.

6) Значение противодействующей силы Q_n должно быть возможно меньшим. Поэтому быстродействующие реле снабжаются маломощными контактами.

7) Значительное уменьшение времени срабатывания получается при применении постоянных магнитов (см. главу 13).

11-6. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ С МАГНИТНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

Исполнения. Для получения замедленного срабатывания применяют в основном системы с демпфирующей катушкой. В таких системах получается выдержка времени как на срабатывание, так и на отпуск. Время $t_н$ на срабатывание значительно меньше, чем на отпуск. Определяется это тем, что при разомкнутом якоре индуктивность катушки в несколько раз меньше, чем при притянутом. Время $t_н$ на срабатывание непостоянно и колеблется при изменениях напряжения сети. Поэтому в схемах управления электроприводами, где реле с магнитным демпфером широко применяется, составляют схемы управления так, чтобы использовать выдержку времени только на отпуск якоря.

При проектировании схем телеуправления учитывают и время $t_н$ на срабатывание, а иногда даже исполняют специальные схемы для увеличения его.

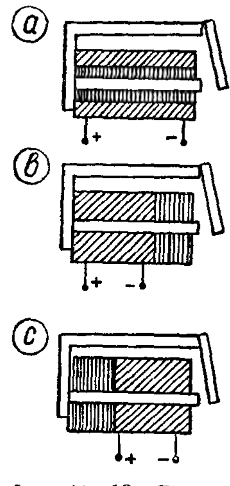
В практике нашли применение две серии реле.

1) Серия кодовых реле. $t_н$ на срабатывание 0,015 — 0,32 *сек*; на отпуск — 0,013 — 1,2 *сек*.

2) Серия первичных реле управления. Эта серия имеет более мощные контакты, чем серия кодовых реле. Время $t_н$ на отпуск — 0,3 — 3,5 *сек*. Имеются исполнения с большими габари-

тами, в которых время $t_н$ на отпуск может быть получено порядка 10—15 *сек*. Реле с магнитным демпфером может быть включено на цепь переменного тока через выпрямитель; рекомендуется применять двухполупериодное выпрямление.

Рабочая катушка. В реле обычного исполнения расчет катушки проводят так, чтобы при напряжении $U = 0{,}85 U_н$ получалось значение н. с., достаточное для притяжения якоря. В реле с магнитным демпфером расчет катушки проводят из условия получения необходимого значения н. с. при $U = 0{,}5 \div 0{,}6\ U_н$; при этом получаются повышенные значения потока при номинальном напряжении в замкнутом состоянии системы.



Фиг. 11, 12. Размещение катушки и демпфера.

Демпфер выполняется в виде гильзы, насаживаемой на сердечник. Имеются исполнения в виде набора шайб. Как правило, демпфер исполняется из меди. В некоторых случаях, когда требуется пониженное значение $t_н$, применяют алюминий. Такое исполнение не допускается в том случае, если реле работает в установке, где возможно появление щелочных паров и газов.

Размещение обмоток. Применяется два способа размещения обмоток.

1) Рабочая катушка и демпфер расположены на сердечнике раздельно (фиг. 11, 12), местоположение демпфера на сердечнике принимается различным: ближе к якорю — у рабочего зазора — исполнение *b*, или у основания сердечника — исполнение *c*. В случае исполнения *b* получается увеличенное значение $t_н$ на срабатывание, в случае *c* — на отпуск. Раздельное размещение принято в кодовых реле.

2) Обе катушки расположены концентрично: непосредственно на сердечнике — демпфер, поверх него — рабочая катушка (фиг. 11, 12*a*) При таком размещении катушек, применяемом в конструкциях реле управления, получается большее значение коэффициента электромагнитной связи k, что приводит к увеличению времени $t_н$.

Магнитопровод должен выполняться из материала с малой коэрцитивной силой, чтобы уменьшить значение остаточного потока в магнитной системе. Как правило, применяется железо Армко марки Э. В кодовых реле ярмо выполняется из железа Армко, сердечник из кремнистой стали круглого профиля.

Конструкция магнитопровода должна быть такой, чтобы нерабочие зазоры магнитной системы были минимальными. Удачное решение дано инженером М. П. Книгиным, предложившим исполнение магнитопровода цельным (фиг. 8, 1 *е*). Такое исполнение

принято заводами Советского Союза для всех реле с магнитным демпфером.

Регулирование времени $t_н$ осуществляется, в основном, изменением натяжения пружины. Ступенчатое регулирование достигается изменением толщины немагнитной прокладки между торцом сердечника и якорем.

Точность по времени $t_н$ в реле с магнитным демпфером относительно невелика и получается порядка 5 — 10%.

Колебания по времени действия определяются в основном изменениями напряжения сети, а также нагрева катушки. Уменьшение влияния этих факторов достигается выполнением магнитной системы насыщенной, когда колебания значения н. с. в пределах $\pm 20\%$ мало отражаются на величине потока в замкнутом магнитопроводе.

Время $t_н$ на отпуск зависит еще и от времени з а р я д а, т. е. времени, протекающего от момента включения катушки до момента, когда поток Φ_1 системы достигает максимального значения. Требуемое время заряда зависит от размеров магнитопровода и демпфера и бывает порядка 0,3 ÷ 0,8 *сек.*

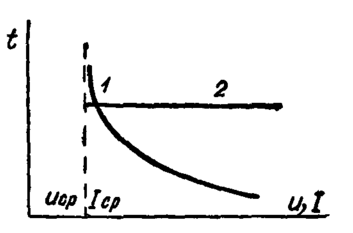
Ниже приводятся данные испытания реле серии РЭ500:

Время заряда, *сек* . . .	0,31	0,5	5
Время $t_н$ на отпуск . .	1,87	2,18	2,2

При составлении схем автоматики учитывают влияние на время $t_н$ времени заряда.

11-7. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ДЕМПФЕРАМИ

а) **Системы с механическими демпферами** выполняются, как правило, с временем $t_д$ на срабатывание. Возврат в исходное положение якоря и связанной с ним контактной системы должен осуществляться при отключении катушки мгновенно. Это необходимо для быстрой подготовки реле к следующему срабатыванию.



Фиг. 11, 13. Характеристика реле.

б) **Для получения значительных выдержек времени** $t_д$ требуется большое значение хода якоря. Поэтому в таких системах применяются прямоходовые электромагниты.

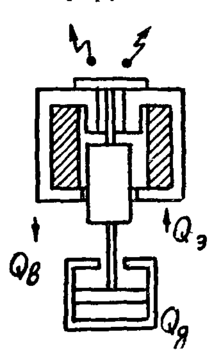
в) **Исполнения.** Системы с механическими демпферами исполняются как реле тока, напряжения, времени.

Реле тока снабжаются токовой катушкой, они применяются для защиты двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме. Временная характеристика таких реле должна быть з а в и с и м о й, т. е. с увеличением силы тока время $t_д$ должно уменьшаться (фиг. 11, 3, *1*).

Реле времени называют такие устройства, в которых получается время срабатывания, не зависящее от приложенного напряжения. Временная характеристика таких реле получается независимой (фиг. 11, 13, *2*).

г) Демпфирующие механизмы в практике применяются разного вида — масляные демпферы, воздушные крылатки, с постоянными магнитами, спусковые механизмы. Выбор механизма определяется требованиями точности. Реле с механическим демпфером могут быть установлены в помещениях, где температура среды колеблется в больших пределах: от —30° зимой до +40° летом. Наиболее часто применяются спусковые механизмы, работа которых не зависит от температуры. Работа других видов механизмов зависит от температуры: в масляных демпферах коэффициент демпфирования зависит от вязкости масла, меняющейся с изменением температуры; в воздушных — от плотности воздуха, в механизмах с постоянными магнитами — от удельного сопротивления материала диска или барабана.

д) Кинематическая схема реле. В общем случае реле состоит из следующих элементов: электромагнита, контактной системы, зубчатой передачи, храпового устройства (или втулки торпедо), демпфирующего механизма.



Фиг. 11, 14. Реле с масляным демпфером.

Назначение зубчатой передачи — уменьшение размеров демпфирующего механизма. С увеличением числа оборотов диска, барабана, крылатки увеличивается коэффициент демпфирования, в спусковых механизмах уменьшается приводной момент M_n на анкерном колесе, что приводит к увеличению периода колебаний T. Соответственно уменьшаются моменты в частях демпфирующего устройства, благодаря чему эти части могут быть выполнены с меньшими размерами.

При применении спусковых механизмов все механические элементы системы — зубчатая передача, храповое устройство и анкерный механизм выполняют в виде одного конструктивного целого, называемого часовым механизмом.

Связь между электромагнитом и демпфером может быть жесткой или гибкой.

Жесткая связь. Примерное устройство приведено на фигуре 11, 14. Временная характеристика при жесткой связи получается зависимой, так как сила на поршне демпфера определяется силой на якоре

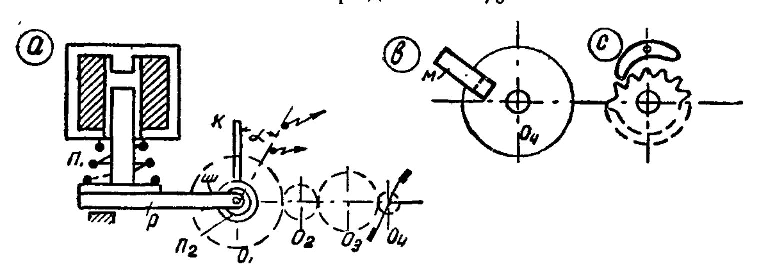
$$Q = kI^2.$$

Гибкая связь может быть осуществлена двояко.

1) Электромагнит при срабатывании заводит пружину $П_2$ (фиг. 11, 15), под действием которой происходит срабатывание

спускового механизма. В данном случае контактная система связана не с якорем, а с демпфирующим устройством. Временная характеристика получается независимой, так как движение спускового механизма определяется натяжением пружины $П_2$, величина которой не зависит от тока в катушке.

2) В разомкнутом состоянии электромагнита под действием пружины $П_1$ заводится пружина $П_2$. При срабатывании электромагнита освобождается рычаг $Р$, который начинает поворачиваться под действием пружины $П_2$. Такое исполнение создает условия для получения большой точности во времени; применяется в реле времени для защиты электрических систем, где требуется высокая точность — порядка 2—3%.



Фиг. 11, 15. Реле с механическим торможением:
a — с крылаткой; *b* — с диском и магнитом; *c* — со спусковым механизмом.

е) Вычисление времени движения. Для вычисления времени $t_д$ применяются различные формулы, в зависимости от вида демпфирующего устройства. В масляных демпферах поршень имеет поступательное движение, электромагнит выбирается таким, чтобы якорь был непосредственно связан с поршнем (фиг. 11, 14). Демпфирующие устройства, исполняемые в виде крылатки, диска или барабана с постоянным магнитом, центробежного регулятора с механическим трением, или в виде спускового механизма, имеют вращательное движение. Связь между электромагнитом и устройством нежесткая.

На фигуре 11, 15 приведено примерное исполнение реле с различными видами демпфирующих устройств: *a* — с крылаткой, *b* — с диском и постоянным магнитом, *c* — со спусковым механизмом.

Электромагнит имеет пружину $П_1$, служащую для завода механизма. На оси O механизма насажены: рычаг $Р$, контактный рычаг $К$, заводная пружина $П_2$ и ведущее колесо. Угол поворота контактного рычага до замыкания контактов α; передаточное отношение зубчатой передачи i.

1) *Масляный демпфер* (фиг. 11, 14). Силы в системе: электромагнитная $Q_э = kU^2$ *кГ*; демпфирующая $Q_д = k_д V$; $k_д — \frac{кГ\ сек}{см}$; $V — \frac{см}{сек}$; вес якоря с поршнем $Q_в$. Ход якоря до замыкания контактов — x *см*.

Из (11-33)

$$t_\partial = k_\partial \frac{x}{kU^2 - Q_в} \text{ сек.} \qquad (11\text{-}36)$$

2) *Воздушная крылатка* (фиг. 11, 15 *а*). Среднее значение вращающего момента заводной пружины $П_2$ с учетом коэффициента полезного действия зубчатой передачи — $M_n\eta$; демпфирующий момент крылатки

$$M_\partial = k_\partial n^2 i^2,$$

где n — число оборотов ведущего колеса (в минуту).
Условие равновесия: $M_n\eta = M_\partial = k_\partial i^2 n^2$.

Отсюда

$$n = \sqrt{\frac{M_n\eta}{k_\partial i^2}}; \quad t_\partial = \frac{\alpha^\circ}{60n} = \frac{\alpha}{60}\sqrt{\frac{k_\partial i^2}{M_n\eta}} \text{ сек.} \qquad (11\text{-}37)$$

3) *Диск с постоянным магнитом* (11, 15 *b*).
Демпфирующий момент $M_\partial = k_\partial ni$.
Условие равновесия: $M_n\eta = M_\partial = k_\partial in$.

$$t_\partial = \frac{\alpha}{60n} = \frac{\alpha k_\partial i}{60 M_n \eta} \text{ сек.} \qquad (11\text{-}38)$$

4) *Спусковой механизм.* Период колебаний анкера

$$T = 2\sqrt{\frac{J\varphi}{M_x}} \text{ сек,}$$

где J — момент инерции анкера,
φ — угол поворота анкера,
M_x — момент на оси ходового колеса.

За период T ходовое колесо поворачивается на один зуб. При числе зубьев ходового колеса z, передаточном отношении механизма i

$$t_\partial = \frac{\alpha z T i}{360} \text{ сек.}$$

Пример. Данные выполненного для реле часового механизма, состоящего из заводной пружины, зубчатой передачи, втулкн торпедо и анкерного механизма:

$$M_x = 1 \ Г\,см; \quad \eta = 0{,}912; \quad M_n = \frac{M_x i}{\eta} = \frac{1 \cdot 7{,}775}{0{,}912} = 8{,}53 \ Г\,см.$$

$$T = 0{,}172 \text{ сек}; \quad z = 24; \quad \alpha = 45^\circ.$$

$$t_\partial = \frac{45 \cdot 24 \cdot 0{,}172 \cdot 7{,}775}{360} = 4 \text{ сек.}$$

ГЛАВА 12

ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ

12-1. ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия. Поляризованные реле представляют собой разновидность электромагнитных и отличаются тем, что в них действуют на якорь два независящих друг от друга потока:

1) постоянный поток, называемый поляризующим, не зависящий от рабочего состояния схемы устройства;

2) рабочий поток, определяемый н. с. рабочей катушки; величина и направление рабочего потока зависит от рабочего состояния схемы.

Особенности поляризованных реле. Поляризованные реле, по сравнению с обычными электромагнитными обладают рядом особенностей.

1) Направленностью действия: при изменении направления тока в рабочей катушке меняется знак результирующего момента на якоре, который перемещается вправо или влево от нейтрали воздушного зазора между полюсами.

2) Высокой чувствительностью, определяемой минимальной требуемой для срабатывания реле мощностью P_c. В поляризованных реле максимальная чувствительность определяется значениями порядка $P_c = 1 \cdot 10^{-6}$ *вт*;

3) Высокой кратностью термической устойчивости, представляющей собой отношение

$$k_T = \frac{\text{допустимый длительный ток включения}}{\text{минимальное значение тока срабатывания}}.$$

В электромагнитных реле значение k_T бывает порядка $1 \div 1{,}5$, в поляризованных — $20 \div 50$.

4) Быстрым действием: в некоторых моделях реле получают минимальное время срабатывания порядка 2 *мсек*.

Применение. Широкое применение получили поляризованные реле в устройствах связи: телефон, телеграф, радио. Такие реле применяют также в устройствах электросиловой автоматики, релейной защиты, в следящих системах, системах телеуправления, железнодорожной сигнализации и блокировке (СЦБ).

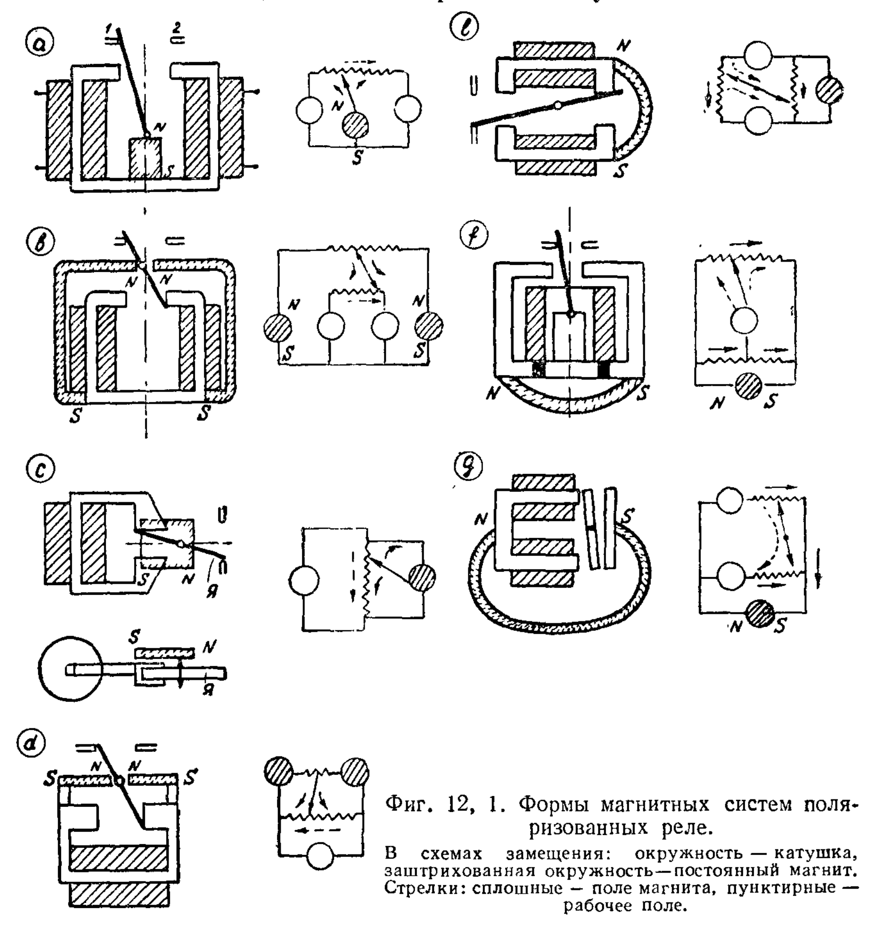
12-2. ФОРМЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Для выполнения поляризованных реле в практике применяются различные формы магнитных систем. Основная классификация этих систем может быть проведена по двум признакам: по источнику н. с. поляризующего поля и по форме системы.

По источнику н. с. поляризованного поля различают:

1) системы с поляризующим полем от постоянного магнита (фиг. 12, 1);

2) системы с поляризующим полем от электромагнита (фиг. 12, 2); в этом случае катушка поляризующего поля приключается к постоянному источнику э. д. с. U_n, не зависящему от рабочего состояния схемы, где включена рабочая катушка



Фиг. 12, 1. Формы магнитных систем поляризованных реле.

В схемах замещения: окружность — катушка, заштрихованная окружность — постоянный магнит. Стрелки: сплошные — поле магнита, пунктирные — рабочее поле.

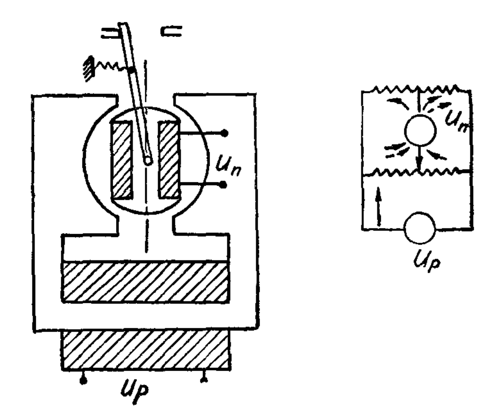
По форме различают системы дифференциальные и мостовые (по виду схемы замещения магнитной системы). Они отличаются друг от друга различным характером распределения в рабочем зазоре потоков — рабочего и поляризующего.

В дифференциальной системе (фиг. 12, 1 *a*, *b*, *c*, *d*) поляризующий поток в левой и правой частях рабочего зазора имеет разные направления, а рабочий поток одно — от одного полюса к другому.

В мостовой системе (фиг. 12, 1 *e*, *g*) картина обратная: поляризующее поле имеет один знак во всем рабочем зазоре, рабочее поле — разные знаки.

Наибольшее распространение получили в практике дифференциальные системы, более простые по конструкции. Однако мостовые системы можно осуществить с большей чувствительностью. Поэтому в последнее время наблюдается тенденция к разработке поляризованных реле с мостовой схемой магнитной системы.

Принципы построения и схемы замещения наиболее распространенных в практике форм магнитных систем поляризованных реле приведены на фигуре 12, 1: системы *b*, *c* — телеграфных реле завода «Красная звезда»; *f* — Вестингауза для устройств автоматики.



Фиг. 12, 2. Магнитная система с поляризующей катушкой.

На фигуре 12, 2 приведена система Чебоксарского завода, с электромагнитной поляризацией от катушки, включенной на постоянный источник напряжения. Система предназначена для исполнения реле обратного тока, применяемого для защиты генераторов постоянного тока при параллельной их работе с другими генераторами или аккумуляторными батареями.

12-3. НАСТРОЙКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ РЕЛЕ

Поляризованные реле могут быть настроены на два режима работы: односторонний — якорь реле срабатывает при одном направлении тока в рабочей катушке; двухсторонний — срабатывание происходит при разных направлениях тока в рабочей катушке. Указанные режимы работы достигаются соответствующей настройкой реле, изменением положения контактных винтов, а также добавлением специальных пружин.

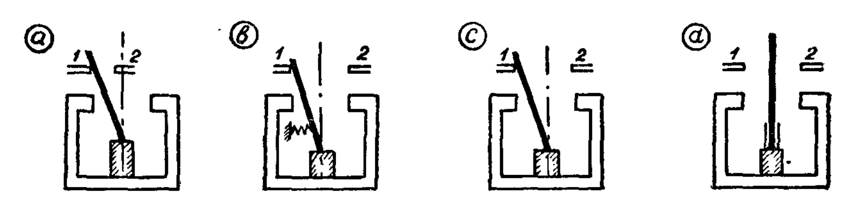
Однопозиционная настройка — магнитное преобладание (фиг. 12, 3*а*). Расположение контактных винтов таково, что якорь при срабатывании не переходит за нейтральную линию рабочего зазора. При обесточенной рабочей катушке поток Φ_1 магнита всегда больше потока Φ_2 — якорь всегда располагается на контакте *1*. Срабатывание якоря — переход на контакт *2* — происходит при одном определенном направлении тока в рабочей катушке (см. направление поля Φ_p на фиг. 12, 5).

Однопозиционная настройка, комбинированное преобладание (фиг. 12, 3*в*). В обесточенном состоянии катушки на якорь действуют два момента:

1) момент, определяемый полем постоянного магнита и 2) момент пружины. При этом момент пружины всегда больше момента,

создаваемого полем магнита. Поэтому при обесточенном состоянии катушки якорь всегда возвращается в положение *1*. Срабатывание якоря происходит при одном определенном направлении тока в рабочей катушке.

Двухпозиционная настройка (фиг. 12, 3*c*). В обесточенном состоянии катушки якорь располагается справа или слева от нейтрали (положения *1*, *2*) в зависимости от направления тока в предшествующем режиме. Срабатывание якоря происходит при разных направлениях тока в рабочей катушке.



Фиг. 12, 3. Настройка поляризованных реле.

a — однопозиционная, магнитное преобладание; *b* — однопозиционная, комбинированное преобладание; *c* — двухпозиционная, *d* — с нейтральным положением якоря.

Двухпозиционная настройка с нейтральным положением якоря. Якорь подвешивается на плоской пружине так, чтобы он занимал при обесточенной катушке нейтральное положение (фиг. 12, 3*d*). Срабатывание якоря — двухстороннее. В некоторых литературных источниках реле с такой настройкой называют трехпозиционными.

12-4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЛЕ

При проектировании поляризованных реле учитывают следующие эксплуатационные параметры, значения которых определяются условиями работы системы.

а) *Давление* $Q_н$ — в нормально замкнутом контакте (н. з.) при обесточенной рабочей катушке. Это давление определяется разностью потоков поляризующего поля в правом и левом зазорах. Значение $Q_н$ в высокочувствительных реле принимают порядка 1—2 *Г*; в реле, где допускается относительно большая мощность срабатывания, значение $Q_н$ достигает значения 15—20 *Г*.

Ход контактов — $x_к$. В реле связи, где рабочее напряжение контактной цепи невелико (порядка 12 — 48 *в*) значение хода контактов принимают небольшим 0,05 ÷ 0,08 *мм*. В устройствах электросиловой автоматики, где рабочее напряжение контактной цепи достигает значения 220 вольт, принимают $x_к$ порядка 0,4 ÷ 0,5 *мм*.

Минимальная мощность срабатывания P_c.

Кратность термической устойчивости $k_T = \frac{I_д}{I_c}$.

Коэффициент возврата, представляющий собой отношение тока отпуска якоря I_0 к току срабатывания I_c: $k_в = \frac{I_0}{I_c}$. В ряде

устройств не предъявляют особых требований к величине $k_в$; необходимо лишь обеспечить условие надежного возврата якоря в исходное положение при обесточенной катушке. В данном случае значение $k_в = 0,1$ считается вполне достаточным.

В некоторых устройствах, учитывая возможные величины остающихся токов небаланса схемы, требуется, чтобы значение $k_в$ было порядка 0,3 — 0,4, в специальных схемах требуется повышенное значение порядка 0,6. Значение $k_в$ определяется настройкой реле. Повышение $k_в$ приводит к ухудшению других параметров реле: времени срабатывания, чувствительности и конечного давления на контактах.

Время срабатывания. При токе $I_с$ время $t_с$ относительно велико 20—50 *мсек* и уменьшается с увеличением значения тока в рабочей катушке. Обычно учитывают время $t_с$ при токе $I = 3 \div 4\, I_с$.

Испытательное напряжение, зависящее от рабочего напряжения катушки и контактной системы.

12-5. РАСЧЕТ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ РЕЛЕ РАЗНЫХ СИСТЕМ

Задачей расчета является установление для системы с определенными размерами соответствующих эксплуатационных параметров.

При расчете поляризованного реле необходимо принимать во внимание некоторые факторы, трудно учитываемые аналитически, например потоки рассеяния постоянного магнита, влияние толщины якоря на величину добавочной силы, вызываемой намагничиванием якоря полем электромагнита. Поэтому для расчета реле пользуются упрощенными соотношениями, которые служат только для ориентировки и установления взаимосвязи между отдельными параметрами реле.

При выводе соотношений, в целях их упрощения, не учитываются падения н. с. в стали магнитопровода, а также составляющие силы, определяемые краевыми потоками и намагничиванием якоря полем электромагнита. Ниже приводятся основные соотношения для расчета реле при разных видах настройки.

Общие положения, принятые при выводе соотношений:

1) Все значения сил, а также перемещения якоря приведены относительно линии mn, соединяющей средины полюсов (фиг. 12, 5). Пересчет этих сил и перемещений по отношению к контактам проводят затем с учетом расстояний от оси якоря.

2) Расчетный воздушный зазор a принят

$$a = A - \Delta, \qquad (12\text{-}1)$$

где A — раствор между полюсами;

Δ — толщина якоря.

3) Рабочие проводимости приняты без учета проводимостей краевых потоков.

При определении индуктивности цепи и коэффициентов рассеяния учитываются дополнительно проводимости потоков краевых и утечки.

В разделе 12-8 приводятся соотношения и ход расчета дифференциальной и мостовой систем с разными видами настройки.

12-6. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Форма магнитной системы. При выборе формы магнитной системы учитывают, с одной стороны, эксплуатационные параметры, с другой — условия производства: конструкция должна быть простой в изготовлении и настройке. Удачное реле получено в модели дифференциальной системы, приведенной на фигуре 12, 1 *с*.

Настройка. Как правило, применяется настройка с магнитным преобладанием. Конструкция выполняется так, чтобы в ней можно было осуществить одно- и двухпозиционную настройку.

Комбинированное преобладание рационально применять в конструкциях, где требуется большой ход якоря — порядка 0,3 *мм* и выше. Сравнительная оценка магнитного и комбинированного преобладания, при однопозиционной настройке, может быть проведена при рассмотрении требуемой величины раствора между полюсами A, значение которого определяет собой чувствительность реле.

Настройка	Раствор	Коэффициент возврата
магнитная	$A = 2x + 2x_1 + 2\delta_0 + \Delta$	$\kappa_в = \frac{x_1}{x + x_1}$
комбинированная . .	$A = x + 2\delta_0 + \Delta$	$\kappa_в = \frac{j \cdot x - Q_{м_0}(1 - a)}{Q_{м_0}(1 + a)}$

Катушки. В обычных исполнениях реле ставится одна катушка (фиг. 12, 1 *с*) или две магнитносвязанные. При необходимости увеличения чувствительности реле увеличивают размеры катушки.

Рассмотрим связь между размерами катушки и потребляемой мощностью реле.

$$P = I^2 r \ (a).$$

В главе 2 (катушки) показано, что

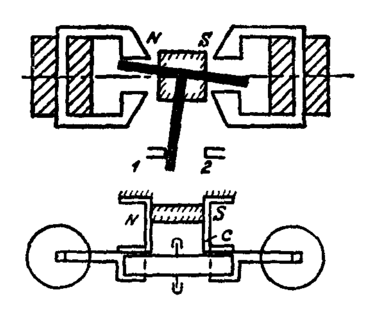
$$r = \kappa w^2 \ (b),$$

где κ — конструктивный коэффициент, значение которого тем меньше, чем больше размеры катушки. Из (a) и (b):

$$P = \kappa (Iw)^2.$$

Таким образом, при требующейся намагничивающей силе срабатывания якоря $F = Iw$ увеличение размеров катушки приводит к уменьшению мощности срабатывания.

Однако увеличение размеров катушки приводит к увеличению постоянной времени системы, T, что влечет за собой увеличение времени срабатывания t. Поэтому при условии получения высокой чувствительности и малых времен срабатывания рациональное решение получается при выполнении сдвоенной системы с двумя катушками, не имеющими магнитной связи (фиг. 12, 4). В такой конструкции постоянная времени T системы определяется значением постоянной времени одной катушки (см. выражение 12-7).



Фиг. 12, 4. Сдвоенная магнитная система:
с — латунная скоба.

Расчет катушки. В зависимости от схемы устройства, где включено реле, расчет катушки проводят по напряжению или по току.

Расчет по напряжению проводится в тех случаях, когда катушка реле приключается к определенному источнику тока или в диагонали моста; расчет по току — когда катушка включается в выходной цепи какого-либо усилителя — магнитного или электронного.

При включении катушки на выпрямленное напряжение переменного тока — двухполупериодное выпрямление — получается пульсирующее поле, приводящее к вибрации якоря. Устранение вибраций может быть осуществлено двумя способами:

1) сглаживанием пульсаций поля, что достигается насадкой на сердечнике магнитопровода коротко замкнутой гильзы из меди, толщиной порядка 0,3—0,5 *мм*;

2) сглаживанием пульсаций тока — включением емкости параллельно катушке.

Магнитопровод. Выбору материала для магнитопроводов поляризованных реле уделяется большое внимание. Для повышения точности работы реле исполняют магнитопровод из материалов, обладающих малой коэрцитивной силой H_c — из железа Армко, пермаллой. При этом на н. с. срабатывания реле меньше сказывается влияние остаточного поля, определяемого н. с. предшествующего режима.

Сечение магнитопровода принимается небольшим, но увеличивается у полюсов с целью увеличения площади сечения рабочего воздушного зазора. Большое значение имеет выбор толщины якоря. С повышением Δ увеличивается добавочная намагничивающая сила, определяемая полем рабочей катушки, т. е. увеличивается чувствительность реле. Однако увеличение Δ приводит к увеличению J, момента инерции, что, в свою очередь, приводит к по-

вышению времени срабатывания. Толщина якоря принимается порядка 1,5—2 *мм*. Крепление якоря рационально проводить на плоской пружинной растяжке. При большом ходе якоря — порядка 0,5 *мм* и выше, приходится крепить якорь в оси. На этой же оси крепится спиральная моментная пружина, применяемая при выполнении комбинированной настройки.

12-7. ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕ

Полное время срабатывания реле t, отсчитываемое от момента включения рабочей катушки до момента замыкания нормально открытого контакта (н. о.), слагается из двух частей: $t_н$ — времени нарастания тока до момента начала движения якоря, $t_д$ — времени движения якоря.

а) Время $t_н$. Включение катушки к источнику постояниого тока:

$$i = I\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (a)$$

где i — ток срабатывания реле; I — значение установившегося тока; T — постоянная времени магнитной системы.

Из (a) имеем

$$t_н = T \ln \frac{I}{I - i}.$$

Таким образом, время $t_н$ в основном определяется значением T. Постоянная времени T может быть вычислена на основании данных магнитной системы. При этом не учитывается магнитное сопротивление магнитопровода, которое во много раз меньше магнитного сопротивления рабочего воздушного зазора. Тогда

$$L = w^2 \sigma G_p,$$

где G_p — проводимость рабочего зазора, определенная без учета краевых проводимостей $G_к$, а

$$\sigma = \frac{G_p + G_к + G_{уп}}{G_p}; \quad G_p = \mu_0 \frac{S}{a}; \quad r = \kappa w^2.$$

Рассмотрим постоянную времени трех видов магнитных систем.

1) Система с одной катушкой (фиг. 12, 1 c):

$$T = \frac{L}{r} = \frac{w^2 \sigma \mu_0 S}{a \kappa w^2} = \sigma \frac{\mu_0 S}{a \kappa};$$

2) Система с двумя катушками, магнитно связанными (фиг. 12, 1 a). Считая κ — значение конструктивного коэффициента для одной катушки, получаем

$$T = 2\sigma \frac{\mu_0 S}{a \kappa}.$$

3) Система с двумя катушками, магнитно не связанными (фиг. 12, 4 или 12, 1 *е*):

$$T = \sigma \frac{\mu_0 S}{a\kappa}.$$

Таким образом, лучшие результаты в отношении получения минимального значения T получаются при сдвоенной магнитной системе.

б) Время t_∂. При вычислении t_∂ следует учитывать, что по ходу якоря меняется значение силы тока в рабочей катушке и значение противодействующих сил. Вычисление t_∂ см. в главе 11.

12-8. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Дифференциальная система однопозиционная. Настройка с магнитным преобладанием (фиг. 12, 5).

Обозначения.

Φ, Φ_1, Φ_2 — потоки в *вб* магнита: полный и в левой, н в правой частях зазора;

Расчетный зазор: $a = A - \Delta$, *см*;

S — рабочая площадь полюса, *см²*;

x — ход контакта, *см*.

x_1 — смещение от нейтрали.

1) Распределение поляризующего поля.

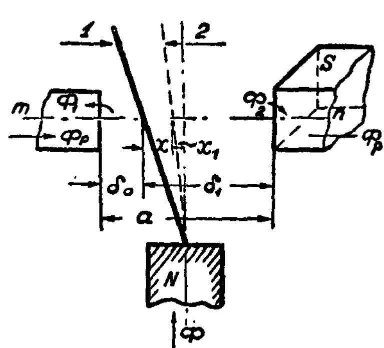
$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ (*a*); $\Phi_1/\Phi_2 = G_1/G_2$ (*b*);

$G_1 = \mu_0 \frac{S}{\delta_0}$ (*c*); $G_2 = \mu_0 \frac{S}{\delta_1}$ (*d*).

Из (*a*, *b*, *c*, *d*)

$$\Phi_1 = \Phi \frac{\delta_1}{a}; \qquad (12\text{-}2)$$

$$\Phi_2 = \Phi \frac{\delta_0}{a}. \qquad (12\text{-}3)$$



Фиг. 12, 5. Магнитная система реле. Магнитная настройка.

2) Сила на якоре при обесточенной катушке (отнесенная к линии *mn*).

$$Q_{мн} = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_1^2}{S} - 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_2^2}{S};$$

$$Q_{мн} = 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{\delta_1 - \delta_0}{aS} \text{ кГ}. \qquad (12\text{-}4)$$

3) Силы на якоре при включенной катушке. При наличии рабочего потока Φ_p

$$Q = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{(\Phi_p + \Phi_2)^2}{S} - 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{(\Phi_p - \Phi_1)^2}{S};$$

или

$$Q = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} - 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{\delta_1 - \delta_0}{aS} \text{ кГ}, \qquad (12\text{-}5)$$

где

$8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} = Q_э$ — сила, определяемая рабочим потоком, она остается постоянной по ходу якоря;

$4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{\delta_1 - \delta_0}{aS} = Q_м$ — сила, определяемая поляризующим потоком; эта сила меняется по ходу якоря. В конечном положении якоря

$$Q_{мк} = 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{2x_1}{aS}. \quad (12\text{-}6)$$

4) Минимальное значение рабочего потока. Значение Φ_{pc} срабатывания определяется из критического условия

$$Q = Q_э - Q_м = 0, \quad (12\text{-}7)$$

Из (12-7), учитывая (12-5),

$$\Phi_{pc} = \Phi \frac{\delta_1 - \delta_0}{2a} = \Phi \frac{x + x_1}{a}. \quad (12\text{-}8)$$

5) Коэффициент возврата. Рассматривая коэффициент возврата по току и учитывая, что рабочие потоки пропорциональны токам, получаем

$$K_в = \frac{I_0}{I_c} = \frac{\Phi_{p0}}{\Phi_{pc}}. \quad (12\text{-}9)$$

Значение Φ_{po} получаем из условия $Q_{эк} = Q_{мк}$.

$$8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_{po}\Phi}{S} = 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{2x_1}{aS};$$

отсюда

$$\Phi_{po} = \Phi \frac{x_1}{a} \quad (12\text{-}10)$$

Учитывая (12-9), имеем

$$K_в = \frac{x_1}{x + x_1}. \quad (12\text{-}11)$$

6) Минимальная мощность срабатывания

$$P = I^2 r \quad (a); \quad r = \kappa w^2, \quad (b)$$

где κ — конструктивный коэффициент, определяемый размерами катушки (см. главу 2).

$$\Phi = I_c w \mu_0 \frac{S}{a}. \quad (c)$$

Из (a, b, c) имеем

$$P_c = \kappa \Phi_{pc}^2 \frac{a^2}{\mu_0^2 S^2}. \quad (12\text{-}12)$$

В системе с двумя катушками, принимая κ для одной катушки, получаем

$$P_c = 0{,}5\kappa \Phi_{pc}^2 \frac{a^2}{\mu_0^2 S^2}. \quad (12\text{-}13)$$

Учитывая (12-4), (12-8) и (12-13), можно найти значение P_c в функции начального давления на контакте $Q_{мн}$.

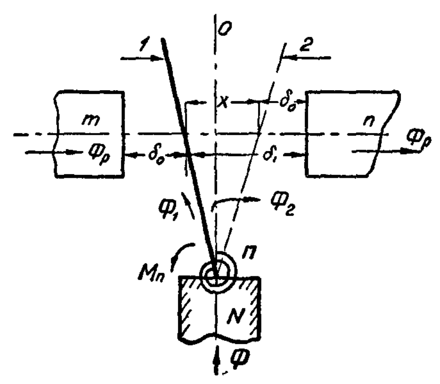
Дифференциальная система. Однопозиционная настройка. Комбинированное преобладание (фиг. 12, 6).

1. Пружина (n): $Q_{пн}$ — начальная сила в положении якоря *1*, отнесенная к линии mn; j — жесткость пружины.

2. Сила на якоре при обесточенной катушке.

$$Q_н = Q_{мн} + Q_{пн}.$$

(Вычисление $Q_{мн}$ и распределение потоков см. выше).



Фиг. 12, 6. Магнитная система реле. Комбинированная настройка.

3. Сила на якоре при включенной катушке. Положение *1*:

$$Q_1 = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} - 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS} - Q_{пн}. \qquad (12\text{-}14)$$

Положение *2*:

$$Q_2 = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} + 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS} - Q_{пн} - jx. \qquad (12\text{-}15)$$

Значение j — жесткости пружины, $\frac{кГ}{см}$, отнесенное к линии mn, принимается из условия получения требуемого значения $к_в$. Обозначив $\alpha = \frac{Q_{пн}}{Q_{мн}}$, получаем из (12-14 и 12-15):

$$Q_1 = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} - 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS} (1 + \alpha); \qquad (12\text{-}16)$$

$$Q_2 = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} + 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS} (1 - \alpha) - jx. \qquad (12\text{-}17)$$

4. Коэффициент возврата $к_в = \frac{I_o}{I_0} = \frac{\Phi_{po}}{\Phi_{pc}}$ (12-9).

Значение Φ_{pc} определим из (12-16), приравнивая электромагнитную силу противодействующей, а Φ_{po} — из (12-9).

Обозначив

$$4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS} = Q_{мн},$$

имеем

$$8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_{pc}\Phi}{S} = Q_{мн}(1+\alpha)$$

и

$$8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_{po}\Phi}{S} = jx - Q_{мн}(1-\alpha),$$

тогда

$$K_в = \frac{jx - Q_{мн}(1-\alpha)}{Q_{мн}(1+\alpha)}. \qquad (12\text{-}18)$$

Дифференциальная система. Двухпозиционная настройка (фиг. 12, 7)

1. *Исходные соотношения* (см. выше).

2. $\Phi_1 = \Phi \frac{\delta_1 + x}{a}; \quad \Phi_2 = \Phi \frac{\delta_0}{a}.$

3. *Сила на якоре при обесточенной катушке*

$$Q_м = 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS}. \qquad (12\text{-}19)$$

4. *Сила на якоре при включенной катушке.* Положение *1*:

$$Q_1 = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p\Phi}{S} - 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{x}{aS}. \qquad (12\text{-}20)$$

После переброски якоря в положение *2*:

$$Q_2 = 8{,}12 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p\Phi}{S} + 4{,}06 \Phi^2 \frac{x}{aS}. \qquad (12\text{-}21)$$

5. *Минимальное значение рабочего потока.* Значение Φ_{pc} — потока срабатывания — определяется из условия $Q_э = Q_м$:

$$\Phi_{pc} = \Phi \frac{x}{2a}. \qquad (12\text{-}22)$$

6. *Минимальная мощность срабатывания* (см. однопозиционную настройку с магнитным преобладанием).

Мостовая система. Двухпозиционная настройка (фиг. 12, 8)

1. *Распределение потоков поляризующего поля*

$$\Phi_1 = \Phi \frac{G_1}{G_1 + G_2} \quad (12\text{-}23); \qquad \Phi_2 = \Phi \frac{G_2}{G_1 + G_2}. \qquad (12\text{-}24)$$

$$G_1 = \mu_0 \frac{S}{2\delta_0}; \quad G_2 = \mu_o \frac{S}{2\delta_1}.$$

2. *Сила на якоре при обесточенной катушке*

$$Q_м = 2 \cdot 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_1^2 - \Phi_2^2}{S} = 8{,}12 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{\delta_1 - \delta_0}{S(\delta_1 + \delta_0)}. \qquad (12\text{-}25)$$

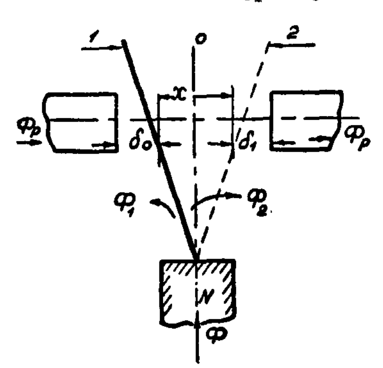
3. Сила на якоре при включенной катушке

$$Q_1 = \frac{2 \cdot 4{,}06 \cdot 10^8}{S} \left[(\Phi_p + \Phi_2)^2 - (\Phi_p - \Phi_1)^2\right];$$

$$Q_1 = 4 \cdot 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_p \Phi}{S} - 8{,}12 \cdot 10^8 \Phi^2 \frac{\delta_1 - \delta_0}{S(\delta_1 + \delta_0)}, \qquad (12\text{-}26)$$

или

$$Q_1 = Q_э - Q_м; \quad Q_2 = Q_э + Q_м.$$



Фиг. 12, 7. Магнитная система, двухпозиционная настройка.

Фиг. 12, 8. Мостовая система реле.

4. Минимальное значение рабочего потока. Исходя из условия $Q_э = Q_м$ из (12-26),

$$\Phi_{pc} = \Phi \frac{\delta_1 - \delta_0}{2(\delta_1 + \delta_0)}.$$

5. Минимальная мощность срабатывания (см. однопозиционную настройку с магнитным преобладанием).

ГЛАВА 13

ОСОБЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ И СХЕМЫ

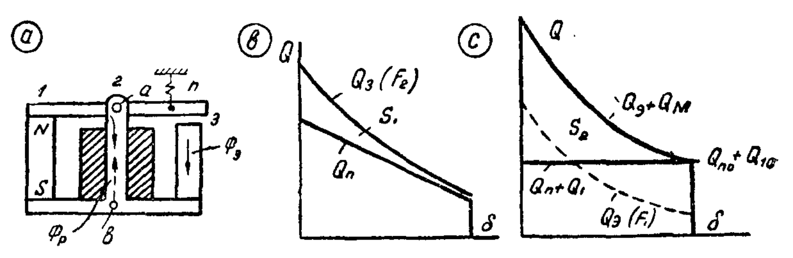
13-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Постоянные магниты применяются в электрических реле уже с давних пор, например при построении поляризованных и магнитоэлектрических реле.

Значительный интерес представляет применение постоянных магнитов в электромагнитных системах. Использование свободной магнитной энергии магнитов в таких системах открывает ряд возможностей построения конструкций реле, контакторов и механизмов уменьшенных размеров, с весьма малыми временами срабатывания, меньше 1 *мсек* (в обыкновенных электромагнитных системах минимальное время получается порядка 3÷10 *мсек*). Это определяется тем, что при наличии потока постоянного магнита

не требуется затраты времени на накопление магнитной энергии для срабатывания, или времени на израсходование накопленной магнитной энергии в массивных системах — для отпуска якоря. Конструкции электромагнита выполняются так, что для срабатывания или отпуска якоря нужно лишь перераспределять энергию постоянного магнита в различных частях магнитопровода, т. е. управлять этой энергией, для чего требуется весьма малое значение энергии, созданной током катушки. Для иллюстрации приведем несколько примеров исполнения электромагнитных систем с постоянными магнитами.

1) **Быстродействующая электромагнитная система** (фиг. 13, 1). Рассмотрим следующие основные положения работы системы.



Фиг. 13, 1. Система с постоянным магнитом:
a — эскиз; *b* — диаграмма системы без магнита; *c* — диаграмма системы с магнитом.

a) Катушка обесточена. Якорь притянут к магниту силой $Q_o = Q_{мо} - Q_{no} - Q_{мз}$, где сила $Q_{мо} = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi^2}{q_1}$; Q_{no} — начальная сила пружины, $Q_{мз} = 4{,}06 \cdot 10^8 \frac{\Phi_3^2}{q_3}$, причем $Q_{мз} \ll Q_{мо}$.

Распределение потоков $\Phi_2 = \Phi \frac{G_2}{G_2 + G_3}$; $\Phi_3 = \Phi \frac{G_3}{G_2 + G_3}$;

G_2 и G_3 — проводимости воздушных зазоров *2* и *3*.

b) Включение катушки. После того, как н. с. катушки достигает величины $F_p > \frac{\Phi_2}{G_2}$, весь поток постоянного магнита и поток электромагнита проходят через зазор δ — якорь притягивается.

c) При размыкании цепи катушки — якорь возвращается в исходное положение.

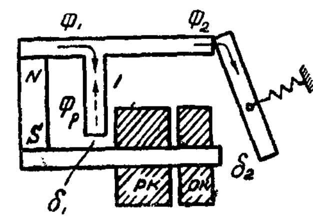
На фигуре 13,1 приведены диаграммы $Q = f(\delta)$ для обычного электромагнита (*b*) и для системы с постоянным магнитом (*c*): требующаяся для срабатывания н. с. катушки $F_1 \ll F_2$, работа на ускорение якоря, характеризующаяся площадками *S*, в системе (*b*) значительно больше чем в системе (*c*): $S_1 \gg S_2$. Оба условия обеспечивают большую скорость срабатывания системы с постоянным магнитом.

2) **Система реле** (фиг. 13, 2). Система выполнена с магнитным шунтом (*1*), имеющим немагнитный зазор δ_1. При обесточенных катушках поле магнита протекает в зазоре шунта δ_1 и якоря δ_2, причем $\Phi_1 \gg \Phi_2$. При включении рабочей катушки (р. к.) поле

Φ_p вытесняет Φ_1, и в якоре протекает весь поток магнита $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$. Якорь притягивается к сердечнику.

Возможны два исполнения реле: быстродействующее без залипания и с залипанием якоря.

В первом случае магнит выбирается таким образом, чтобы при замкнутом якоре сила, определяемая полем Φ_2, $Q_{м2} = 4{,}06 \cdot 10^8 \Phi_2^2/q$, была меньше силы Q_n — растянутой пружины.

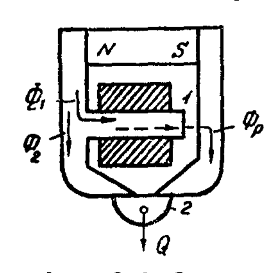


Фиг. 13, 2. Система реле.

Во втором случае магнит выбирается так, чтобы при обесточенной катушке и притянутом якоре $Q_{м2} > Q_n$.

Описанная система, в случае исполнения её в качестве реле с залипающим якорем, снабжается добавочной отбойной катушкой (о. к.), поле которой действует против поля магнита. Исполненные согласно эскизу (фиг. 13, 2) конструкции отличаются весьма малыми габаритами, малой потребляемой мощностью и весьма малыми временами срабатывания.

3) Реле с залипающим якорем завода «Транссвязь» выполнено в виде кодового реле (фиг. 1, 28), но сердечник катушки изготовляется из хромистой стали. При кратковременном включении катушки сердечник намагничивается и остаточное поле его достаточно для удерживания якоря при отключенной катушке. Рассматриваемая система менее рациональна, чем система, изображенная на фигуре 13, 2, так как в данном случае требуется затрата энергии на создание поля в зазоре якоря, причем н. с. катушки должна быть высокой, учитывая относительно большое значение магнитного сопротивления хромистой стали.



Фиг. 13, 3. Система удерживающего магнита.

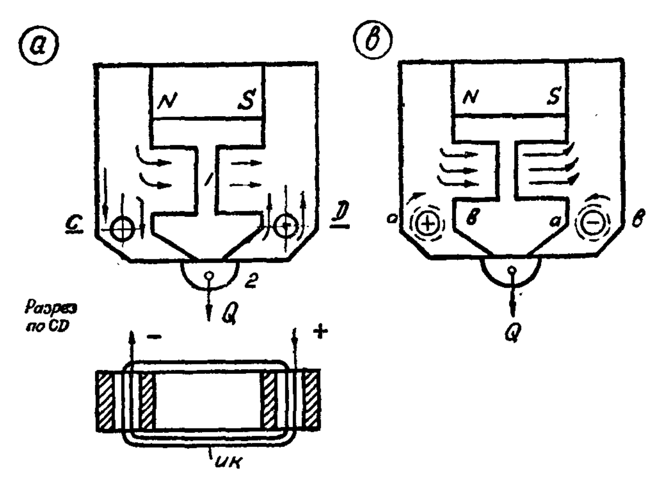
Исполнение описанного реле оправдывается тем, что в данном случае завод не должен разрабатывать специальной модели и использует существующую модель кодового реле.

4) Удерживающие магниты. В ряде устройств автоматики необходимы удерживающие механизмы с весьма быстрым отключением в требуемый момент времени. Применение удерживающих электромагнитов для таких целей нерационально, лучшее решение задачи получается при исполнении конструкции с постоянными магнитами: при этом достигается минимальная затрата магнитной энергии и значительно большие скорости срабатывания (система с подъемной силой 25 *кГ* может быть выполнена с временем срабатывания меньше 1 *мсек*).

На фигуре 13, 3 приведен эскиз удерживающего магнита с электромагнитным отключением. При замыкании цепи катушки поток постоянного магнита отводится целиком по шунту (*1*) и

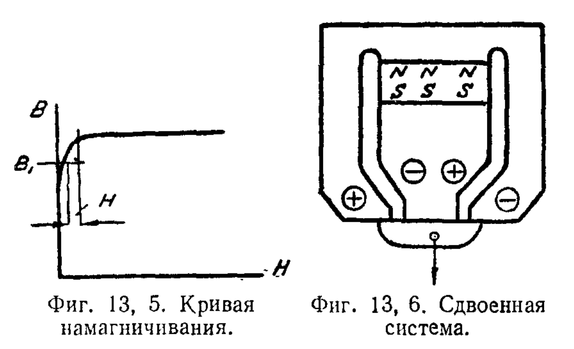
якорь (2) отпадает. В данной конструкции необходимо учитывать полярность включения катушки.

Другое исполнение удерживающего магнита приведено на фигуре 13, 4. Катушка наматывается в самом магнитопроводе (см. разрез *CD*). При обесточенной катушке поток магнита удерживает



Фиг. 13, 4. Система удерживающего магнита.

якорь, оттягиваемый внешней силой *Q* (13, 4*a*). При включении катушки поток последней вытесняет поле магнита из зоны якоря: в частях *a* (фиг. 13, 4*b*) — вследствие наличия противодействующей н. с. катушки, в частях *b* — вследствие насыщения участка. Весь поток магнита замыкается в этом случае через шунт.



Фиг. 13, 5. Кривая намагничивания.

Фиг. 13, 6. Сдвоенная система.

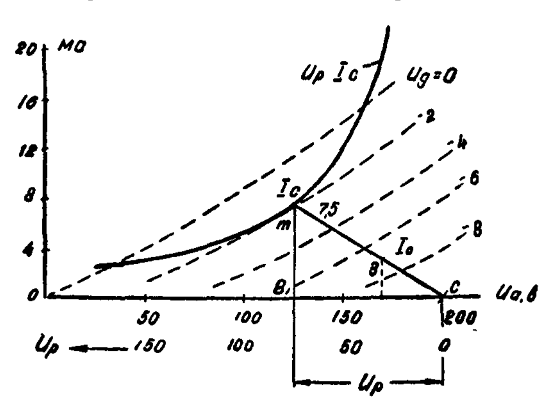
Для выполнения описанной системы применяются магнитные материалы, обладающие крутой характеристикой (фиг. 13, 5), например никелевые стали с индукцией насыщения $B_s = 0{,}8 \cdot 10^{-4} \frac{вб}{см^2}$ или $B_s = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$.

Индукция B_1, определяемая полем постоянного магнита, должна быть в сечении q_1 близка к индукции насыщения B_s. Для создания условия насыщения участков *b* достаточно небольшого значения напряженности поля *H* катушки.

Вариант исполнения сдвоенной модели приведен на фигуре 13, 6.

При исполнении устройств автоматики приходится применять разнообразные схемы включения реле. При этом выбор параметров реле определяется условиями работы схемы. Ниже проводится анализ работы нескольких характерных схем, которые не охватывают, однако, всего разнообразия схем включения реле.

а) **Электромагнитное реле в схеме электронного усилителя.** При включении реле в анодную цепь лампы нужно подобрать оптимальные данные катушки: r, w, d проволоки. Для этой цели пользуются двумя вольт-амперными характеристиками: электронной лампы и реле.



Фиг. 13, 7. Совмещение характеристик лампы и реле.

1) Характеристики реле. Для данной рассматриваемой конструкции известны значения F_c — н. с. срабатывания и F_0 — отпуска якоря. Потребляемая мощность реле при токе срабатывания:

$$P_c = U_c I_c = I_c^2 r = I_c^2 w^2 \rho \frac{l_{cp} \cdot 10^{-8}}{f_\kappa \cdot l_\kappa h_\kappa}. \tag{13-1}$$

Обозначая

$$k = \rho \frac{l_{cp} \cdot 10^{-8}}{f_\kappa l_\kappa \cdot h_\kappa}$$

получаем

$$U_c I_c = \kappa (Iw)_c^2 = \kappa F_c^2. \tag{13-2}$$

Отсюда

$$I_c = \frac{\kappa F_c^2}{U_c}. \tag{13-3}$$

Строится кривая $I_c = f(U_c)$ (фиг. 13, 7), которая совмещается с анодной характеристикой лампы, как это показано на рисунке. Проводя прямую cm к точке касания обеих характеристик, и проектируя точку m на ось абсцисс, получаем два отрезка: OB_1 — определяющий собой падение напряжения в лампе, и B_1C — падение в реле U_p. Тогда сопротивление обмотки реле $r = \frac{U_p}{I_c}$. По заданной величине F_c и полученному значению r можно провести расчет катушки для определения ее обмоточных данных. Из диаграммы устанавливаются требуемые значения напряжения смещения.

Пример. Задано — лампа 6С5; реле: $F_c = 25\,ав$; коэффициент возврата $\kappa_в = \frac{I_o}{I_c} = 0{,}4$; коэффициент катушки $\kappa = 8{,}97 \cdot 10^{-4}$. Напряжение сети 220 *в*. Найти электрическое сопротивление реле, число витков, напряжения смещения лампы — срабатывания и отпуска.

Решение: Из (13-2):

$$P = U_c I_c = \kappa F_c^2 = 8{,}97 \cdot 10^4 \cdot 625 = 0{,}56\ вт.$$

Строим кривую $I_c = f(U_c)$, задаваясь различными значениями U_c, откладывая значение U_c влево по оси абсцисс (от точки c). При проведении прямой cm к точке касания характеристик реле и лампы получаем:

ток срабатывания $I_c = 7{,}5\ ма$; $U_p = 75\ в$,

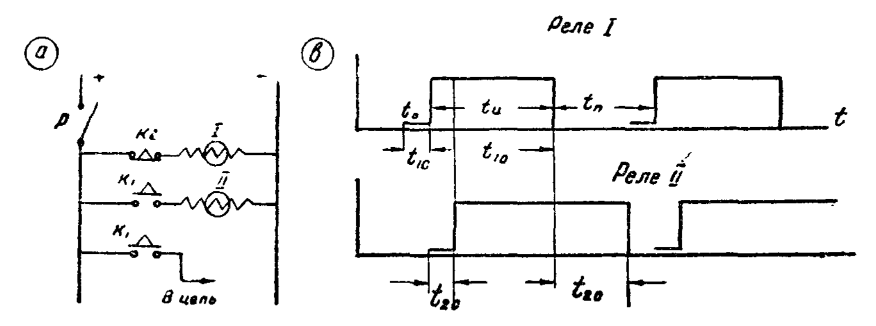
$$r = \frac{75 \cdot 10^3}{7{,}5} = 10000\ ом;\ \text{число витков}\ w = \sqrt{\frac{r}{\kappa}} = 3400;$$

ток отпуска $I_o = I_c \kappa_в = 7{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-3} = 3\ ма$.

Напряжения смещения: срабатывания $U\partial = -2\,в$; отпуска $-U\partial = -7\,в$.

б) **Схема пульс-пара.** В устройствах автоматики часто применяются схемы, называемые пульс-пара, служащие для создания импульсов с определенной длительностью и паузой импульса (генераторы импульсов). Задача решается посредством двух электромагнитных реле с магнитным демпфером (см. главу 11). Время t_c на срабатывание в таких реле относительно невелико, порядка 0,15 секунды. Время t_o на отпуск может быть получено в пределах до нескольких секунд.

На фигуре 13, 8 приведена примерная схема пульс-пара. Контакты реле: 1→2 н. о. замыкающихся мгновенно, размыкающихся — при обрыве цепи катушки — с выдержкой времени; II→I н. з.



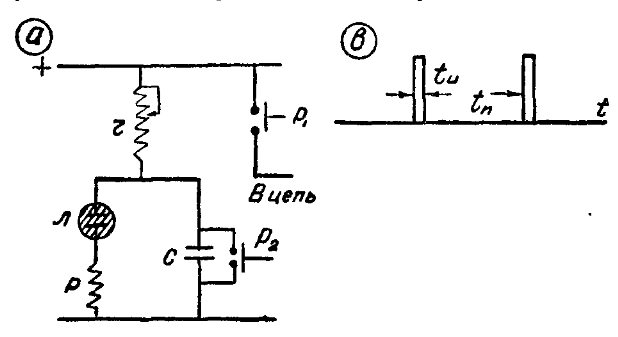
Фиг. 13, 8. Схема и временная диаграмма пульс-пары.

контакт, размыкающийся мгновенно, замыкающийся с выдержкой времени (на схеме стрелка на контакте показывает направление выдержки).

Работа схемы поясняется временно́й диаграммой. В момент времени t_0 замыкается рубильником P цепь катушки реле I, через время t_{1c}, включаются контакты: κ_1 — цепи катушки 2 и κ_1 — цепи куда подается импульс.

При срабатывании реле *II* (t_{2c}) размыкается цепь катушки (*I*), но якорь реле отпадает через время t_{10}. Это же время определяет собой длительность замыкания контактов κ_1 — длительность импульса t_u. Пауза t_n определяется временем t_{20} замедления на отпуск реле (*II*) плюс время t_{c1}.

В ряде случаев требуется получение кратковременного импульса с относительно длительной паузой. Пример выполнения соответствующей схемы приведен на фигуре 13, 9.



Фиг. 13, 9. Схема и временная диаграмма импульсного генератора.

В схеме применена лампа с тлеющим разрядом, контур rC и быстродействующее высокочувствительное реле, например в исполнении с постоянным магнитом (фиг. 13, 2). Конденсатор C контура при достижении определенного напряжения заряда U_c, соответствующего пробою лампы, разряжается через обмотку реле. Последнее своим контактом P_1 посылает импульс в цепь, контактом P_2 накоротко замыкает емкость с целью устранения остаточного заряда.

Длительность паузы: $t_n = rC$.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ИНДУКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И РЕЛЕ

ГЛАВА 14

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

14-1. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА

Индукционными называются такие электромеханические системы, в которых вращение подвижной части, ротора, получается от взаимодействия магнитных полей статора с токами, индуктируемыми этими полями в роторе. Индукционные системы применяются для построения реле различных исполнений: тока, напряжения, мощности, сопротивления, частоты, коэффициента мощности и других.

Наибольшее распространение получили индукционные реле в устройствах релейной защиты, некоторые исполнения применяются в устройствах автоматики.

Разработка индукционных реле проводится в два этапа.

1) Проектирование и расчет индукционной системы — разрабатывают систему определенной формы, определенных габаритов с учетом возможности применения этой формы для различных видов реле. Устанавливают определенные значения расчетных и конструктивных параметров разработанной системы.

2) Проектирование и расчет реле — по выбранной форме индукционной системы разрабатывают схему включения катушек и вычисляют параметры реле.

При выборе индукционной системы для данного вида реле учитывают ряд факторов: требуемую электромагнитную характеристику, т. е. зависимость рабочего момента на роторе и замеряемой электрической величины, сложность конструкции, временные характеристики.

Момент на роторе индукционной системы получается при наличии потоков, действующих на ротор, и сдвинутых в пространстве и во времени.

При расчете системы необходимо знать соотношения между электрическими параметрами сети, а именно, подведенным к системе током, напряжением, и магнитными параметрами — потоками, создаваемыми в магнитной системе. Эти соотношения определяются из расчета магнитной системы.

Каждый полюс магнитной системы снабжается или катушкой тока, включенной последовательно в цепь тока I, или катушкой напряжения, включенной на напряжение сети U. В первом слу-

чае элемент магнитной системы рассматривается как трансформатор тока, во втором — как трансформатор напряжения. Вторичной обмоткой в обоих случаях является ротор. Все соотношения характеризуются ниже векторными диаграммами. При построении этих диаграмм принимаются следующие допущения.

1) Явления рассматриваются с учетом работы магнитной системы в ненасыщенном состоянии; значение индукции в магнитопроводе системы не превышает $(0{,}4 \div 0{,}5)\ 10^{-4}$ *вб/см*^{2}, и в первом приближении не учитывается падение магнитного потенциала в стали.

2) Не учитывается индуктивное сопротивление ротора, которое во много раз меньше электрического: принимается, что вектор тока, индуктированного в роторе, совпадает по фазе с вектором э. д. с.

3) Не учитывается индуктивность рассеяния катушки (в воздухе).

Наиболее трудной при расчете системы является задача определения магнитных проводимостей путей потока по воздуху, так как картина поля полюсов в воздушных путях системы весьма сложна. Поэтому расчетные данные указанных проводимостей корректируют данными экспериментальной проверки, которую проводят для определенной модели индукционной системы.

14-2. МАГНИТНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПУТЕЙ МАГНИТОПРОВОДА

Необходимо вычислять значение проводимости в воздухе для магнитного поля отдельных полюсов. Вычисление проводят методом разбивки поля на простые фигуры или на основании эмпирических кривых Шмиделя.

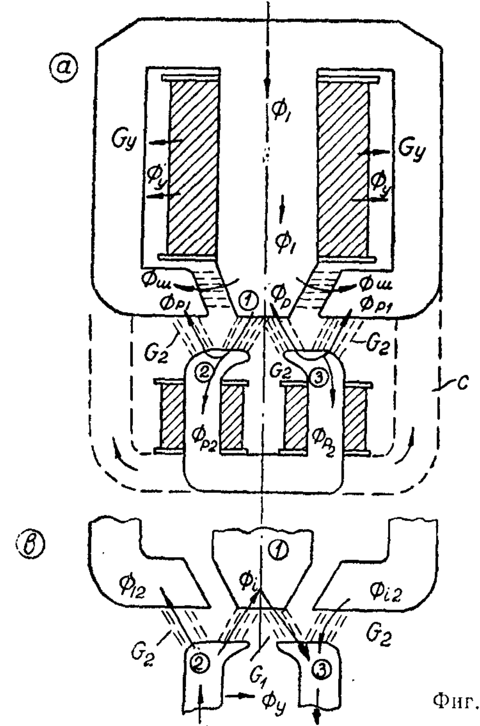
Метод Шмиделя удобен для определения проводимости зазора у полюсов. Поле в зазоре полюса неоднородно, и в расчетах принимают усредненное значение индукции B, которое получается как отношение потока к приведенной площади полюса S_n. Если площадь полюса $S = ab$, то по формулам Шмиделя получают $S_n = a_1 b_1$. По кривым находят переход от a и b к a_1 и b_1.

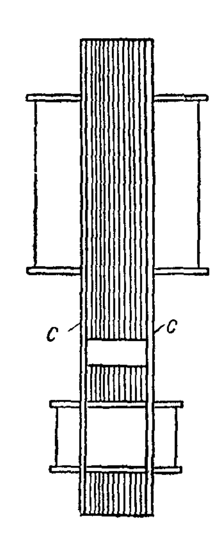
Тангенциальная система. Отдельно рассматривается картина распределения поля, определяемого намагничивающей силой катушки верхнего магнитопровода, отдельно нижнего.

Поток Φ_1 (фиг. 14, 1 *а*) состоит из рабочего потока Φ_p, полюса *1*, пронизывающего диск, и шунтирующих — $\Phi_ш$ и $\Phi_у$.

Поток Φ_p возвращается в магнитопровод по двум путям: через полюсы *2* и *3* по воздуху и через стальную скобу C, связывающую верхний и нижний магнитопровод.

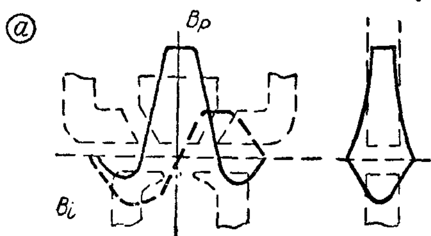
Поток Φ_i, определяемый н. с. катушек нижнего магнитопровода, выходит из полюса *2* (фиг. 14, 1 *в*), разветвляется на потоки Φ_{i1}, Φ_{i2} и $\Phi_у$.

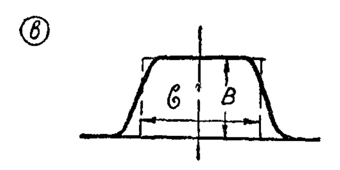




Фиг. 14, 1. Распределение потоков в индукционной системе:
a — верхнего; *b*—нижнего магнитопровода.

Некоторая неопределенность при расчете получается вследствие трудностей, связанных с учетом магнитного сопротивления пути потока $Ф_{р2}$ по скобе (*C*). Это сопротивление зависит от качества сборки магнитной системы.





Фиг 14, 2. Распределение индукции в индукционной системе:
a – в рабочих зазорах тангенциальной;
b – у полюсной дуги системы с барабаном.

На фигуре 14, 2 показана примерная картина распределения индукции в зазорах у полюсов системы. Ниже приведены данные измерений, проведенных в индукционной системе реле мощности.

Потоки верхнего магнитопровода:

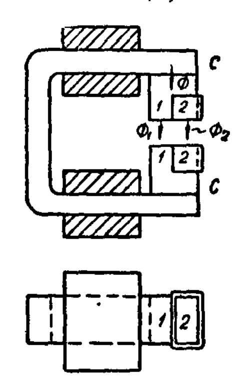
н. с. катушки = 275 *ав*;
напряжение $U = 100\,в$;

$$Ф_р = 5{,}8 \cdot 10^{-5}\ вб;$$
$$Ф_{р2} = 2{,}1 \cdot 10^{-5}\ вб;$$
$$Ф_1 = 1{,}98 \cdot 10^{-5}\ вб.$$

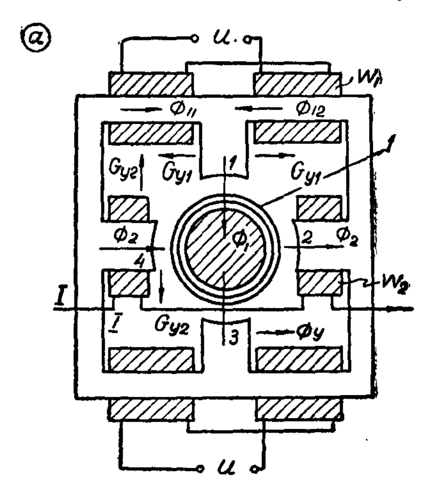
Потоки нижнего магнитопровода:

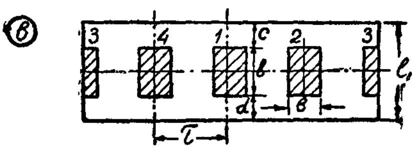
н. с. катушек $= 170$ *ав*; $I = 5$ *а*; $\Phi_i = 4{,}4 \cdot 10^{-5}$ *вб*.

Экранированная система рассматривается состоящей из двух полюсов: первый — без экрана, второй — охватываемый экраном (фиг. 14, 3). При вычислении магнитных сопротивлений для каждого полюса учитывают сопротивление у зазора, для сборного магнитопровода учитывают дополнительно магнитное сопротивление стыков (C).

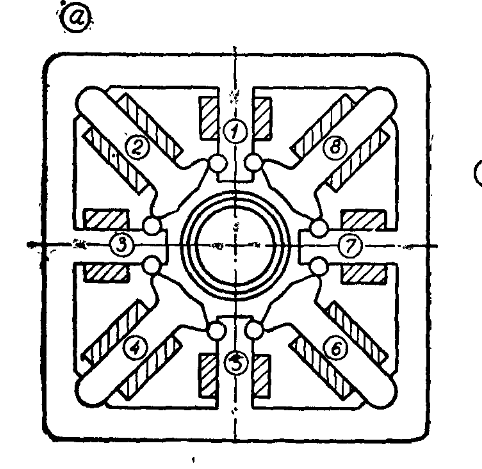


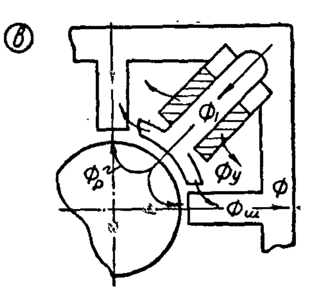
Фиг. 14, 3. Распределение потоков в экранированной системе:
1 — сердечник; 2 — экран.





Фиг. 14, 4. Магнитная система в 4-полюсном исполнении:
1 — ротор.





Фиг. 14, 5. Магнитная система в 8-полюсном исполнении.

Система с барабаном. Рассмотрим для примера магнитную систему четырехполюсного исполнения реле мощности (фиг. 14, 4). Катушки тока размещаются на сердечниках полюсов, катушки напряжения — на ярме магнитопровода, который выполняется сборным.

Поток Φ_1 пронизывает ротор два раза. Магнитное сопротивление воздушного промежутка учитывается как удвоенное сопротивление воздушного промежутка у одного полюса. Вычисление этого сопротивления или обратной ему величины магнитной проводимости удобней производить, пользуясь разверткой полюса и барабана.

На фигуре 14, 5 показано исполнение восьмиполюсной индукционной системы и распределение потоков одного из полюсов.

14-3. КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ

Значения коэффициентов рассеяния полюсов σ — определяют для вычисления индуктивного сопротивления катушек. Коэффициент рассеяния определяют как отношение

$$\sigma = \frac{\psi_p + \psi_y}{\psi_p},$$

где ψ_p и ψ_y — соответственно числа потокосцеплений потоков рабочего полюса и утечки.

Для удобства расчетов принимают во внимание не числа потокосцеплений, а соответствующие им проводимости. В ряде случаев потоки утечки не сцепляются со всеми витками катушки. Поэтому принимают в таких случаях значение G_{yc} — приведенное по числу потокосцеплений значение проводимости.

Примеры. 1) Тангенциальная система, верхний магнитопровод (фиг. 14, 1):

$$G_{yc} = \frac{G_y}{3}; \quad \sigma = \frac{G_p + G_ш + G_{yc}}{G_p},$$

где $G_ш$ и G_y — вычисленные по геометрическим размерам проводимости в обе стороны сердечника.

2) Система с барабаном — катушки на ярме (фиг. 14, 4*а*)

$$\sigma = \frac{G_p + G_{y1}}{G_p},$$

где G_{y1} — значение проводимости утечки, вычисленное по геометрическим размерам.

3) Катушки на полюсах. Поток Φ_2 сцепляется со всеми витками катушек. Поток утечки каждого из полюсов сцепляется только с частью витков одной из катушек.

Число потокосцеплений рабочего потока $2w_2\Phi_2$;

Число потокосцеплений потока утечки $2w_2\Phi_y$;

$$G_{yc} = \frac{G_{y2}}{3}; \quad \sigma = \frac{G_p + G_{yc}}{G_p}.$$

14-4. УГОЛ ПОТЕРЬ

Углом потерь будем в дальнейшем считать угол между векторами тока катушки и потока системы. Для определения угла потерь необходимо вычислить следующие значения (см. фиг. 14, 6):

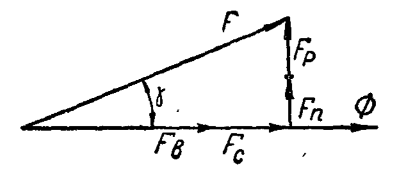
а) н. с. для проведения потоков в воздухе $F_в$ и стали F_c;

б) н. с., компенсирующую потери на гистерезис и вихревые токи $F_п$ и потери в роторе $F_р$.

Для вычисления указанных значений н. с. задаются определенной величиной рабочего потока, такой, чтобы индукция в магнитопроводе была порядка $0,4\ \frac{вб}{см^2}$. Это обычное значение индукции в индукционных системах. Тогда

$$F_в = \frac{\Phi}{\sqrt{2}G};\quad F_c = ав \cdot l,$$

где $ав$ — удельные ампервитки, определяемые по кривым намагничивания материала;



Фиг. 14, 6. Векторная диаграмма.

l — средняя длина силовой линии в стали магнитопровода.

$$F_п = \frac{P}{U}w = \frac{\sqrt{2}P}{\omega\sigma\Phi},$$

где P — потери в ваттах на гистерезис и вихревые токи;

σ — коэффициент рассеяния системы.

Значение $I_р$ вычисляется по формулам, приведенным в параграфе 15-5. Число витков ротора принимается равным 1.

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{F_р + F_п}{F_в + F_c}. \qquad (14\text{-}1)$$

Значение γ несколько меняется при изменении потока в системе. Практически, однако, это изменение незначительно и угол потерь считают постоянным. В некоторых случаях удобней вычислять угол потерь по приведенным значениям токов.

14-5. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Векторные диаграммы строят для получения данных относительно составляющих тока катушки и углов между векторами.

Тангенциальная система. Верхний магнитопровод (фиг. 14, 7). Построение диаграммы начинают с потока $\Phi_р$ — рабочего потока, пронизывающего диск; учитывая, что система рассматривается как линейная, задаются любым значением $\Phi_р$, но при условии, что значение индукции в системе получится небольшим, порядка $0,4 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2$.

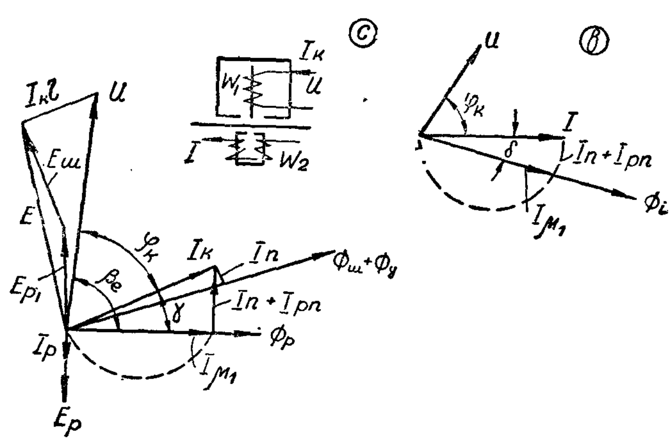
При построении векторной диаграммы:

1) составляющие тока $I_{\mu в}$ определяют по потоку $\Phi_р$ и проводимостям $G_р$;

2) составляющие $I_{\mu c}$ определяют по полному потоку $\Phi = \Phi_p + \Phi_ш + \Phi_y$, т. е. при нахождении значения H по кривой намагничивания учитывают значение B, а не B_p;

3) составляющие тока потерь $I_п$ также находят по потоку Φ. Находят полное значение потерь P в ваттах. Распределяют эти потери пропорционально потокам Φ_p и $\Phi_y + \Phi_ш$:

$$P_1 = P\frac{\Phi_p}{\Phi};\quad P_2 = P\frac{\Phi_y + \Phi_ш}{\Phi}.$$



Фиг. 14, 7. Векторные диаграммы тангенциальной системы.

Приведенные значения токов:

$$I_{pп} = \frac{I_p}{w};\quad I_{п1} = \frac{P_1}{U};\quad I_{п2} = \frac{P_2}{U}.$$

Из векторной диаграммы определяют значения углов:

1) $\varphi_к$ — между U и $I_к$; 2) потерь γ.

В данном исполнении системы оба угла остаются приближенно постоянными при разных напряжениях (при условии полного заполнения окна магнитопровода). В расчетах систем часто применяют значение β_e — угла $U - \Phi_p$; $\beta_e = \varphi_k + \gamma$. В исполняемых индукционных системах значение β_e колеблется в пределах 85—105°. Меньший угол получается при большем зазоре шунта, больший — при минимальном зазоре. Угол γ — бывает порядка 12°.

Нижний магнитопровод обычно снабжается катушками тока, которые включаются последовательно (фиг. 14, 7 *c*). Построение диаграммы (фиг. 14, 7 *b*) начинают с вектора Φ_i, пронизывающего диск. Задаются определенным значением Φ_i. Данные векторной диаграммы:

$E_p = 4{,}44 f\Phi_i$ вольт;

$I_{pп} = \frac{I_p}{2w_2};\quad I_п = \frac{P}{U_c};$

U_c — падение напряжения на катушках.

При вычислении потерь на гистерезис и выхревые токи учитывается также и поток рассеяния магнитопровода.

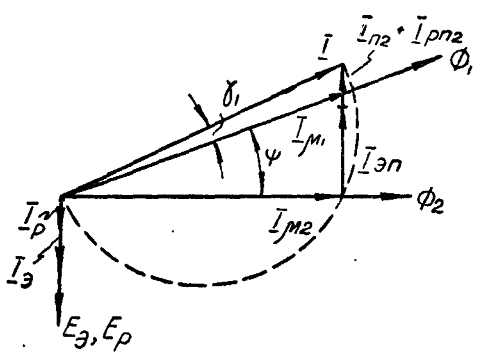
I_μ определяется из соотношения $\sqrt{2} I_\mu 2w_2 G_p = \Phi_i$. Из векторной диаграммы определяют угол потерь $\gamma_н$:

$$\operatorname{tg} \gamma_н = \frac{I_{pn} + I_n}{I_\mu}.$$

В определенной магнитной системе угол потерь $\gamma_н$ остается приближенно постоянным при различных значениях тока I, значение его в исполненных системах — порядка 12°.

Угол $\varphi_к$ — между вектором тока I и вектором падения напряжения на катушке U_c — порядка 60—62°.

Векторная диаграмма экранированной системы (фиг. 14, 8). Поток Φ магнитопровода разделяется у полюсов на два потока: Φ_1 — протекающего в неэкранированной части зазора и Φ_2 — в экранированной. Магнитная система рассматривается как система с двумя полюсами: *1* и *2* (фиг. 14, 3). Магнитные сопротивления по пути прохождения потоков Φ_1 и Φ_2 различны, поэтому оба потока не равны друг другу и сдвинуты по фазе на угол ψ. Векторные диаграммы для реле с катушкой тока и напряжения строятся аналогично. Построение диаграммы начинают с потока Φ_2.



Фиг. 14, 8. Векторная диаграмма экранированной системы.

Данные векторной диаграммы:

$I_{эп}$ — приведенное значение тока экранов:

$$I_{эп} = \frac{E_э}{r_э w} = \frac{\omega \Phi_2}{\sqrt{2}\, r_э w} \text{ ампер}.$$

При вычислении $r_э$ учитывают, что оба экрана — на нижнем и верхнем полюсах — включены параллельно. Тогда

$$r_э = \frac{r_в + r_н}{2}; \quad w_э = 1.$$

Далее пренебрегают индуктивным сопротивлением экрана, весьма малым сравнительно с омическим. Вычисление остальных параметров диаграммы производят, как указано выше.

Угол ψ между потоками Φ_1 и Φ_2 определяется в основном значением тока $I_{эп}$ и с некоторым приближением вычисляется

по следующей формуле:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{I_{эп}}{I_{\mu 2}} = \frac{\omega \Phi_2 \sqrt{2} w_1 G_2}{r_э \cdot w \Phi_2} = \frac{\omega G_2}{r_э}. \tag{14-2}$$

Угол ψ бывает порядка 45—50°.

Векторные диаграммы систем с барабанным ротором строятся по одному из указанных методов.

14-6. ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ РОТОРА

Во всех рассмотренных случаях влияние реакции ротора учтено при построении диаграммы введением приведенного тока $I_{рп}$, индуктированного в диске.

Влияние реакции ротора оказывается на уменьшении потоков полюсов. Поэтому экспериментальную проверку параметров магнитной системы необходимо производить над системами со вставленным ротором. При проведенных испытаниях четырехполюсной системы с барабанным ротором получены следующие данные, характеризующие влияние реакции ротора.

Полюс	и. с. ампер-витков	Поток, вебер •	
		Ротор вставлен	Ротор вынут
С катушкой тока . .	156	$4{,}7 \cdot 10^{-5}$ 80%	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$ 100%
С катушкой напряжения	205	$7 \cdot 10^{-5}$ 90%	$7{,}75 \cdot 10^{-5}$ 100%

14-7. СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛОВ β_e и β_i

Важными для расчета параметрами индукционной системы являются углы:

β_e — между вектором напряжения U и рабочим потоком Φ_p полюса с катушкой напряжения. Значение β_e (фиг. 14,7) определяется как сумма углов $\varphi_к$ и γ и зависит от величины шунтирующего потока магнитопровода, величины омического сопротивления катушки и других данных системы.

β_i — между вектором тока I катушки тока и потоком Φ полюса. Обычно угол β_i равен углу потерь γ (фиг. 14,7). Каждая форма индукционной системы характеризуется определенным значением углов $\varphi_к$ и γ, а следовательно, β_e и β_i. Эти углы остаются приближенно постоянными при различных режимах работы реле, так как индукция в магнитопроводе системы не достигает значения насыщения.

При разработке некоторых исполнений реле необходимо иметь значения β_e и β_i отличные от нормальных значений данной системы. Существует несколько способов изменения этих углов.

Изменение угла β_e. Для изменения угла в небольших пределах — порядка 20—30° — включают последовательно с катуш-

кой напряжения добавочное омическое сопротивление; при этом уменьшается угол $\varphi_к$, а следовательно и угол β_e.

Введением последовательно с катушкой напряжения емкостного сопротивления можно уменьшить значение β_e в больших пределах.

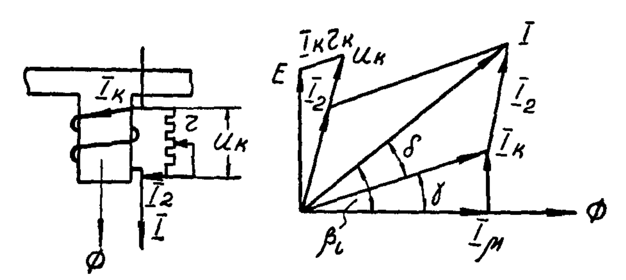
Изменение угла β_i. Для изменения этого угла применяется несколько способов.

1) Шунтирование катушки тока омическим сопротивлением (фиг. 14, 9). Из векторной диаграммы

$$I_2^2 = I_к^2 + I^2 - 2I_к I \cos\delta; \qquad (а)$$

$$U_к = I_к Z_к = I_2 r_2. \qquad (б)$$

В полученных соотношениях неизвестны I_k, I_2 и r_2, значения $Z_к$ и угла γ известны.



Фиг. 14, 9. Схема для изменения угла β_i.

Задаваясь значением $I_к$ в виде определенной величины от тока I сети (например $I_к = 0{,}8I$), можно, пользуясь выражениями (*а*) и (*б*), найти значение r, необходимое для получения угла δ.

Тогда

$$\beta_i = \delta + \gamma.$$

2) На сердечнике насаживается коротко замкнутая гильза.

При наличии на сердечнике такой гильзы (фиг. 14, 10) угол β_i увеличивается. Приведенное к числу витков w основной катушки значение тока в гильзе

$$I_{2n} = \frac{I_2}{w} = \frac{E_2}{r_2 w} = \frac{\omega\Phi.}{\sqrt{2}\, r_2 w}; \qquad (а)$$

далее

$$\Phi = \sqrt{2}\, I_\mu w G, \qquad (б)$$

где r_2 — омическое сопротивление гильзы; индуктивным сопротивлением пренебрегают.

Подставляя (*б*) в (*а*), получим

$$I_{2n} = \frac{I_2}{w} = \frac{\omega I_\mu G}{r_2}. \qquad (в)$$

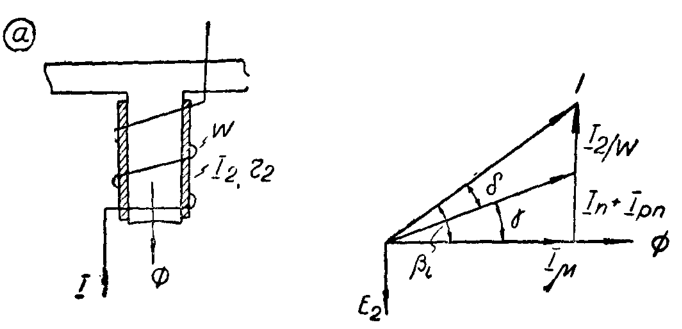
В данной системе известно значение угла γ, значением угла β_i задаются:

$$\operatorname{tg}\beta_i = \frac{I_{pn} + I_n + I_{2n}}{I_\mu} = \frac{I_\mu \operatorname{tg}\gamma + \omega I_\mu G/r_2}{I_\mu}, \qquad (г)$$

или

$$\operatorname{tg}\beta_i = \operatorname{tg}\gamma + \frac{\omega G}{r_2}. \qquad (д)$$

Из (*д*) определяют значение r_2 и геометрические размеры гильзы. Гильза выполняется обычно из меди.



Фиг. 14, 10. Исполнение полюса с гильзой:
1 — гильза.

3) *На сердечнике насаживается дополнительная катушка, включаемая на емкость.* В дополнительной катушке (фиг. 14, 11) индуктируется ток I_2; фаза вектора I_2 определяется соотношением между индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Обычно подбирают емкость к условиям резонанса. Приведенное значение тока I_{2n} вторичной обмотки определится из соотношения

$$I_{2n} = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{E_2 w_2}{Z_2 w_1} = \frac{\omega \Phi w_2^2}{\sqrt{2}\, Z_2 w_1} = \omega I_\mu w_2^2 \frac{G}{Z_2}.$$

При настройке вторичного контура в резонанс

$$I_{2n} = \omega I_\mu w_2^2 \frac{G}{r_2}. \quad (a)$$

В главе 2 показано, что при определенных заданных габаритах катушки

$$r_2 = k w_2^2.$$

Тогда

$$I_{2n} = \omega I_\mu \frac{G}{k}. \qquad (б)$$

Из векторной диаграммы (фиг. 14, 11 *b*)

$$\operatorname{tg}\beta_i = \frac{I_{pn} + I_n + I_{2n}}{I_\mu} = \operatorname{tg}\gamma + \frac{\omega G}{k},$$

или

$$k = \frac{\omega G}{\operatorname{tg} \beta_i - \operatorname{tg} \gamma}.$$

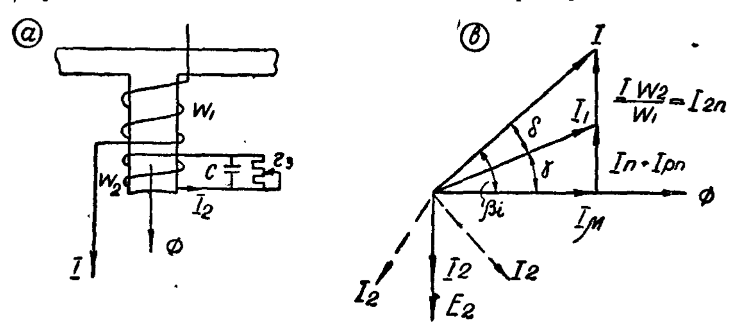
Для установления числа витков катушки задаются определенным значением емкости порядка $1 \div 2 \mu F$. Из условия

$$\omega w^2 G = \frac{1}{\omega C}$$

находим

$$w = \frac{1}{\omega \sqrt{GC}}.$$

По известным, заданным в конструкции, габаритам катушки и по числу витков вычисляют значение диаметра проволоки. Точная



Фиг. 14, 11. Исполиенне полюса с добавочной катушкой.

настройка для получения необходимого угла осуществляется регулируемым электрическим сопротивлением, шунтирующим емкость C.

Из рассмотренных трех способов изменения угла β_i наиболее часто применяется третий — введение дополнительной катушки, включенной на емкость, так как при этом способе получается меньшее значение мощности в *ва*, потребляемой катушкой.

ГЛАВА 15

ТОКИ В РОТОРЕ

15-1. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ, НАВЕДЕННЫЕ В РОТОРЕ

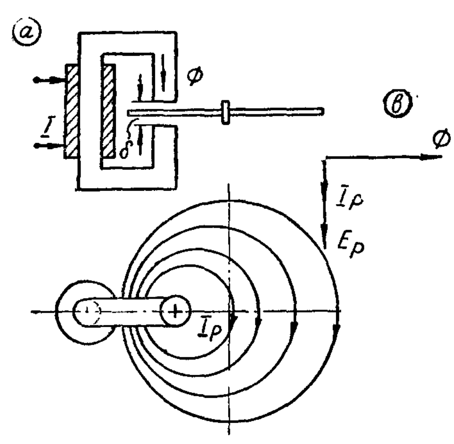
При наличии в магнитной системе потока, пересекающего ротор, в последнем возникают токи индукции, вследствие наведенных в нем электродвижущих сил. Различают два вида э. д. с., наведенных в роторе:

а) э. д. с. трансформации, получающаяся при пронизывании ротора магнитным потоком полюсов;

б) э. д. с. резания, получающаяся при пересечении вращающимся ротором поля полюсов.

При неподвижном роторе существует только э. д. с. трансформации, при вращении ротора добавляется еще э. д. с. резания.

а) Электродвижущая сила трансформации. На фигуре 15, 1 показан элемент системы с диском. Поток, созданный в магнитной системе обмоткой с током I, пересекает диск, расположенный в воздушном зазоре δ. В диске индуктируется э. д с. E_p, отстающая по фазе от потока на 90°.



Фиг. 15, 1. Токи трансформации в диске.

Под действием э. д. с. в диске протекает ток I_p. При проведении расчетов принимают число витков диска равным единице. Далее пренебрегают индуктивным сопротивлением диска и полагают, что токи I_p и э. д. с. E_p совпадают по фазе.

Действующее значение э. д. с.

$$E_p = 4{,}44\ f\Phi \text{ вольт,}$$

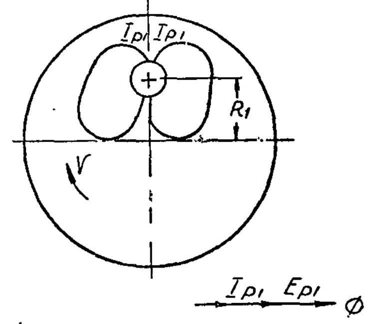
где f — частота в *гц*, Φ — в веберах; $w = 1$.

Обозначив электрическое сопротивление диска r_p, получаем

$$I_p = \frac{E_p}{r_p} \text{ ампер.}$$

Аналогичная картина получается и в системе с барабаном (фиг. 15, 3).

Поток Φ, определяемый н. с. катушек *1* и *3*, проходит от полюса *1* через ротор и сердечник к полюсу *3*, наводит в роторе э. д. с. E_p. Направление токов показано на разрезе барабана, а также на развертке барабана в плане (фиг. 15, 3).



Фиг. 15, 2. Токи резания в диске.

б) Электродвижущая сила резания. При вращении ротор пересекает поток магнитной системы, и в нем (роторе) индуктируются э. д. с. резания E_{p1}, создающие токи резания I_{p1}, препятствующие вращению ротора (согласно закону Ленца).

Направление э. д. с. перпендикулярно вектору V, скорости вращения ротора. Вектор E_{p1} совпадает по фазе с вектором потока. Картина распределения токов резания показана на фигуре 15, 2.

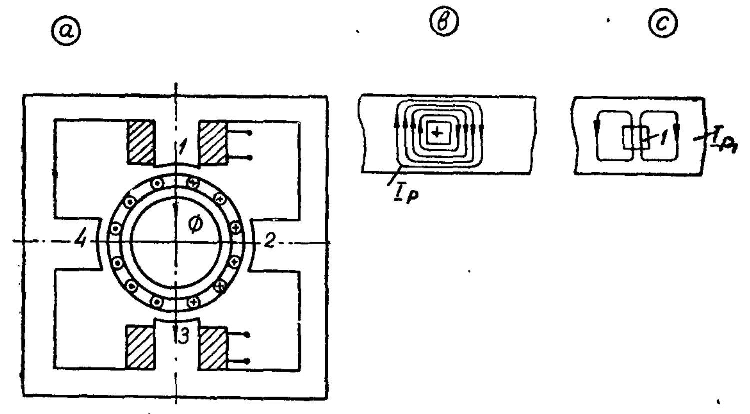
Действующее значение э. д. с. резания

$$E_{p1} = \frac{B}{\sqrt{2}} V l_n \text{ вольт,}$$

где B — индукция в $\frac{вб}{см^2}$;

V — скорость вращения ротора под полюсом в *см/сек*;

l_n — длина в *см* проводящей нити ротора под полюсом в направлении, перпендикулярном движению ротора.



Фиг. 15, 3. Разрез и развертки барабана:
a — разрез; *b* — токи трансформации; *c* — токи резания.

Обозначив электрическое сопротивление диска для трубок токов резания r_{p1}, получаем

$$I_{p1} = \frac{E_{p1}}{r_{p1}} \text{ ампер.}$$

На фигуре 15, 3 показана в развертке картина распределения токов резания в барабане.

15-2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ ТРАНСФОРМАЦИИ

Токи трансформации в роторе рассматриваются в виде отдельных трубок. При расчете системы необходимо определить значение плотности тока, протекающего в определенном месте ротора, например под определенным магнитным полюсом.

Затруднения возникают при определении значения сопротивления определенной трубки тока.

Наиболее просто определяется значение r_p, при симметричном расположении круглого полюса по отношению к диску. В этом случае токи трансформации I_p имеют вид концентрических трубок. Однако в практических случаях полюс всегда располагается несимметрично относительно диска: имеются исполнения дисков не круглой формы, сечение полюса имеет вид прямоугольника, квадрата.

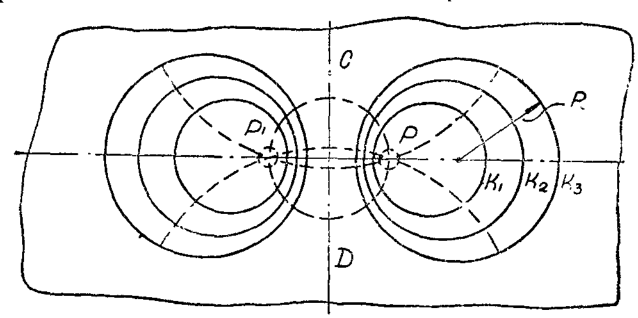
Во всех этих случаях отступления от полной симметрии токи в диске или барабане располагаются в виде трубок, граничные поверхности которых имеют весьма разнообразные и часто не поддающиеся анализу формы. В сложных случаях распределения токов в роторе подсчет сопротивлений трубок тока трансформации производится графо-аналитическим путем.

Наиболее часто исполняются системы с круглым диском с полюсами, расположенными несимметрично относительно центра (фиг. 15, 1). В этих случаях токи I_p рассматриваются в виде трубок с граничными уровнями, которые представляются в виде неконцентрических цилиндрических поверхностей. В системах с барабаном получается аналогичная картина распределения токов (фиг. 15, 3).

При расположении полюсов согласно фигурам 15, 1 и 15, 3 можно получить выражение для аналитического определения значения тока. Для этого пользуются методом отображений магнитного поля — по аналогии с методом отображений электрического поля.

15-3. МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ С ДИСКОМ

Рассмотрим круглый диск радиусом R с полюсом P, расположенным вне центра диска (фиг. 15, 4). Трубки токов имеют граничные окружности κ_1, κ_2, κ_3... По методу отображений диск рассматривается как часть бесконечно протяженного листа, на



Фиг. 15, 4. Линия токов в диске.

который действует два поля: полюса P — действительного, и полюса P' — воображаемого — обратного полюсу P полярности.

Полюсы P и P' индуктируют в бесконечно большом листе токи, равные индуктированному значению э. д. с., деленному на омическое сопротивление трубки тока.

Эквипотенциальные линии э. д. с. представляют собой радиальные линии, выходящие из каждого полюса и образующие окружности с центрами, расположенными на линии CD. В каждом месте эквипотенциальные линии э. д. с. располагаются нормально к линиям токов — κ_1 — κ_2 — κ_3, которые также представляют собой окружности.

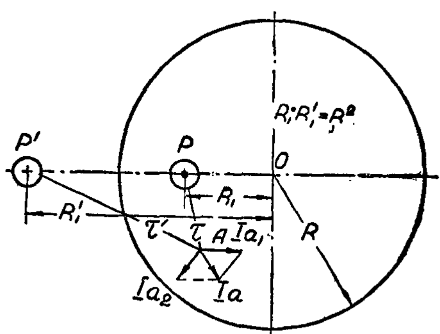
Таким образом, вокруг полюсов P и P' располагаются трубки токов, ограниченные окружностями κ_1, κ_2 ... и т. д. Каждая трубка тока рассматривается в данном случае независимо от других.

Если вырезать одну или несколько трубок тока, это не влияет на протекание процесса во всем листе бесконечно больших размеров. Поэтому можно вырезать в этом листе часть, по расположению и размерам соответствующую диску реле с полюсом, с тем, однако, условием, чтобы граничная окружность диска соответствовала определенной кривой. Направление и величины токов в вырезанной части диска при этом не меняются.

На основании изложенного получается следующее правило для вычисления значений токов трансформации в определенной точке A диска (фиг. 15, 5); находят положение воображаемого полюса и рассматривают значение тока в точке A состоящим из суммы двух токов:

I_{a1}, определяемого э. д. с. E_1 от поля полюса P;

I_{a2}, определяемого э. д. с. E_2 от поля полюса P'.



Фиг 15, 5. Диаграмма для определения токов в диске.

Ниже приводятся основные соотношения для вычисления плотностей токов j_{a1} и j_{a2} в точке A диска.

а) Месторасположение воображаемого полюса. Расстояние R_1' полюса P' определяется из соотношения

$$R_1R_1' = R^2. \tag{15-1}$$

б) Э. д. с. E для трубки тока, расположенной вне полюса

$$E = 4{,}44 f\Phi \text{ вольт}. \tag{15-2}$$

Э. д. с. для трубки тока, расположенной в пределах полюса,

$$E = 4{,}44 f\Phi\, R_\kappa^2/R_n^2,$$

где R_κ — радиус трубки тока; R_n — радиус круглого полюса.

в) Сопротивление трубки тока радиусом τ, шириной $d\tau$, при полюсе P, расположенном в центре диска, определяется из выражения

$$dr = \frac{2\pi\tau}{\gamma\Delta d\tau}\ \textit{ом}, \tag{15-3}$$

где τ и $\Delta\tau$ — в *см*;

Δ — толщина диска в *см*;

γ — удельная проводимость диска в $\frac{1}{\textit{ом} \cdot \textit{см}}$.

г) Плотности токов. При вычислении плотности токов j_{a1} и j_{a2} учитывают, что трубки токов располагаются концентрично с полюсами P и P'. Это вытекает из метода отображений (см. выше). Тогда, учитывая расстояния точки A от центров полюсов τ и τ', пользуясь (15-2) и (15-3), получаем

$$j_{a1} = \frac{dI_{a1}}{\Delta d\tau} = \frac{E}{\Delta dr d\tau} = \frac{\omega \Phi \gamma \Delta \, d\tau}{\sqrt{2}\, 2\pi\tau\Delta \, d\tau} \text{ ампер.}$$

Или при $\gamma = 34 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ом \cdot см}$ (уд. проводимость алюминия), $f = 50$ *гц*

$$j_{a1} = 1{,}2 \cdot 10^7 \frac{\Phi}{\tau}. \tag{15-4}$$

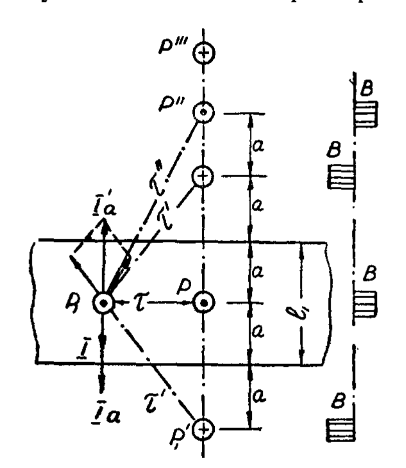
Аналогично

$$j_{a2} = 1{,}2 \cdot 10^7 \frac{\Phi}{\tau'}. \tag{15-5}$$

Из выражений (15-4) и (15-5) видно, что плотности токов в диске обратно пропорциональны расстоянию точки A от центров полюсов.

15-4. МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ С БАРАБАНОМ

Рассмотрим систему с барабаном. Для удобства вычислений будем пользоваться разверткой барабана в плоскости (фиг. 15,6). В такой системе барабан в развертке рассматривается как часть бесконечно большого листа, на который действуют поля: действительного полюса P и воображаемых полюсов P' и P'' разной полярности.



Фиг. 15, 6. Диаграмма для определения токов в барабане.

Все эти полюсы индуктируют в бесконечно большом листе токи, равные индуктированному значению э. д. с., деленному на сопротивление по пути тока. Вокруг полюсов P и P', P'' располагаются трубки токов, ограниченные окружностями.

Если вырезать одну или несколько трубок тока, это не влияет на протекание процесса во всем листе бесконечно больших размеров. Поэтому в листе можно вырезать часть, по расположению и размерам соответствующую развертке барабана с полюсом P.

В данном случае получается следующее правило для вычисления значений токов трансформаций в определенной точке A развертки барабана: находят положение воображаемых полюсов и рассматривают значение тока I в точке A состоящим из суммы токов:

I_a — определяемым э. д. с. E от поля полюса P;

I'_a и I''_a — определяемым э. д. с. от поля воображаемых полюсов P', P'' и т. д.

Число воображаемых полюсов равно бесконечности.

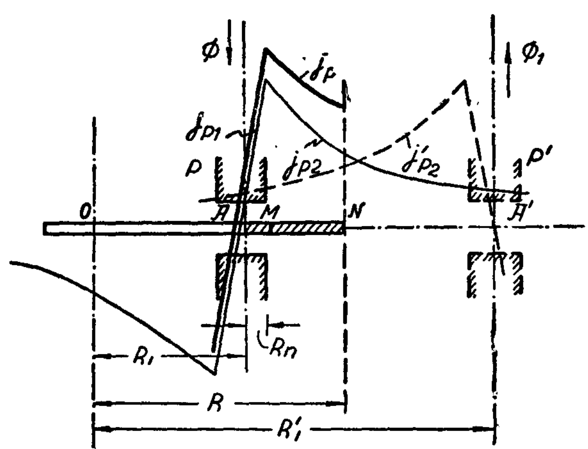
Практически достаточно рассмотреть действие только двух ближайших воображаемых полюсов, так как величины токов I_a, индуктируемых полем отдаленных воображаемых полюсов, незначительны.

Месторасположение воображаемых полюсов находится в зависимости от расстояния a от центра действительного полюса до края развертки барабана. Обычно располагают полюс посредине длины барабана. Поэтому расстояние ближайших воображаемых полюсов до края развертки также равно a (фиг. 15, 6).

Значения плотностей токов вычисляют согласно формуле (15-4).

15-5. ПОЛНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА ТРАНСФОРМАЦИИ

Для учета влияния реакции ротора необходимо определить величину тока трансформации I_p, индуктированного полем полюса P во всем роторе. Вычисление будем производить, пользуясь методом отображений и полученными ранее соотношениями.



Фиг. 15, 7. Распределение плотностей токов трансформации в диске.

а) Вычисление токов трансформации в диске. Все трубки токов, индуктируемых в диске, проходят через сечение AN. Задача заключается в вычислении тока I_p, протекающего по сечению AN (фиг. 15, 7).

Ток I_p состоит из следующих частей:

I_{p1} — определяемого полем полюса P — зона AM ($R_k < R_n$);

I_{p2} — » » » P — зона MN ($R_k > R_n$);

I'_{p2} — » » » P' — зона AN.

1) I_{p1}; $E_{p1} = \frac{\omega \Phi}{\sqrt{2}} \frac{R_k^2}{R_n^2}$; $j_{p1} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \frac{R_к^2}{R_n^2} \frac{1}{R_к}$;

$dI_{p1} = j_{p1} \Delta dR_к$;

$$I_{p1} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \frac{1}{R_n^2} \int_0^{R_n} R_к \, dR_к = \frac{1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta}{2} \qquad (a)$$

2) I_{p2}; $j_{p2} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \frac{1}{R_к}$;

$dI_{p2} = j_{p2} \Delta dR_к = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \frac{dR_к}{R_к}$

$$I_{p2} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \int_{R_к = AM}^{R_к = AN} \frac{dR_к}{R_к} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \ln \frac{AN}{AM} \qquad (b)$$

$$3) \; I'_{p2} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \ln \frac{A'A}{A'N} \qquad (c)$$

4) $I_p = I_{p1} + I_{p2} + I_{p3}$,

или $I_p = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \left(0{,}5 + \ln \frac{AN \, A'A}{AM \, A'N}\right)$.

Величины AN, $A'A$, AM и $A'N$ можно выразить в функции основных параметров системы: R, R_1, R'_1 и R_n; полное значение тока трансформации в диске при наличии поля Φ полюса P

$$I_p = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \left[0{,}5 + \ln \frac{(R - R_1)(R'_1 - R_1)}{R_n (R_1^1 - R)}\right], \qquad (15\text{-}6)$$

где Φ в веберах.

б) *Вычисление токов трансформации в барабане.* Принимают для упрощения задачи только два воображаемых полюса (фиг. 15, 8). Вычисление токов проводится по аналогии с методом, примененным для диска.

Полюс	Зона	Радиус	Составляющие токи
P	OM	$R_к < R_n$	$I_{p1} = \frac{1{,}2 \cdot \Phi \Delta \cdot 10^7}{2}$;
P	MN	$R_к > R_n$	$I_{p2} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \ln \frac{ON}{OM}$;
P'	$O'N$		$I'_p = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \ln \frac{O'O}{O'_1N}$
P'_1	O'_1N		$I'_{p1} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi \Delta \ln \frac{O'_1N}{O'_1O}$

Учитывая, что $ON = a$; $OM = R_n$; $O'O = 2a$; $O'N = a$ и т. д., получаем полное значение тока трансформации в роторе при наличии поля Φ полюса P:

$$I_p = 1{,}2 \cdot 10^7 \cdot \Phi\Delta \left[0{,}5 + \ln\frac{a}{R_n} + \ln 2 - \ln 1{,}5\right]. \qquad (15\text{-}7)$$

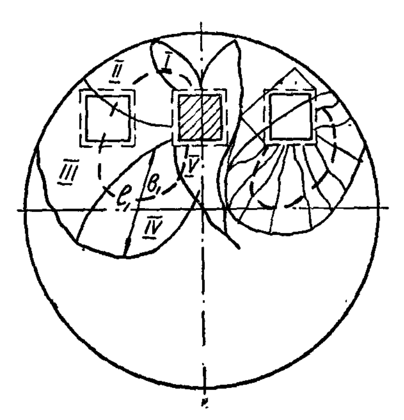
Фиг. 15, 8. Распределение плотностей токов трансформации в барабане.

15-6. ТОКИ РЕЗАНИЯ

Трубки токов резания имеют в роторе весьма сложную конфигурацию, что затрудняет проведение аналитических расчетов. В таких случаях применяют графические методы расчета. На чертеже, изображающем диск или развертку барабана, вычерчивают эквипотенциальные линии э. д. с. резания, а по ним определяют граничные кривые трубок токов. Трубки разбивают на участки и вычисляют сопротивления этих участков.

На фигуре 15, 9 показано примерное построение трубок токов резания под полюсами тангенциальной системы. Трубка разбита на шесть участков.

Сопротивление каждого участка $r_i = \frac{l_i}{\gamma b_i \Delta}$ *ом*;



Фиг. 15, 9. Графическое определение трубок токов резания.

Полное сопротивление трубки $r = \Sigma r_i$;

Значение тока резания $I = \frac{E}{r}$.

Пример. Вычислить сопротивление r тока резания, определяемого полем среднего полюса (фиг 15, 9). Ток резания рассматривается состоящим из двух частей — левой и правой трубки. Толщина диска равна 0,1 *см*. Вычислим сопротивление левой трубки. Вся трубка разбита на 6 частей. Данные расчета сведены в таблицу.

Часть	Средняя длина l_i	Средняя ширина b_i	r_i, *ом*
I	1,2	1,2	$0{,}0294 \cdot 10^{-3}$
II	1,1	1,7	$0{,}0182 \cdot 10^{-3}$
III	2,7	2,9	$0{,}0274 \cdot 10^{-3}$
IV	2,0	3,3	$0{,}0178 \cdot 10^{-3}$
V	0,9	1,15	$0{,}0230 \cdot 10^{-3}$
VI	1,7	1,15	$0{,}0435 \cdot 10^{-3}$

$$\sum r_i = 0{,}1593 \cdot 10^{-3}$$

$$r = \frac{0{,}1593 \cdot 10^{-3}}{2};$$

ГЛАВА 16

МОМЕНТЫ НА РОТОРЕ

Условием получения рабочего момента на роторе индукционной системы является наличие в системе двух или нескольких потоков, смещенных в пространстве и не совпадающих во времени.

Взаимодействием индуктированных в роторе токов трансформации с потоками полюсов создаются вращающие моменты на роторе. В основу расчетов для определения рабочих моментов принят метод отображений: учет влияния краевого эффекта производится с помощью воображаемых полюсов.

Б. К. Булем разработан ряд простых соотношений для определения рабочих моментов на диске. Расчет систем с барабаном детально разработан Л. А. Гельбухом, который дал ряд соотношений, позволяющих вычислять значения рабочих и тормозных моментов и анализировать влияние отдельных параметров для установления оптимальных значений.

Ниже приводится метод определения рабочих моментов на роторе, основанный на вычислении плотностей индуктированных токов. Этот метод является общим для расчета систем с диском и с барабаном и предусматривает применение простых геометрических фигур, что позволяет ориентироваться в выводе основных формул.

16-1. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ

Электромагнитные моменты на роторе вычисляются по закону Био и Саварра Мгновенное значение силы Q_t при длине l_n проводника под полем

$$Q_t = iB_t l_n.$$

Пусть

$$B_t = B \sin \omega t; \quad i = I_м \sin(\omega t - \varepsilon),$$

где ε — угол отставания тока по отношению к потоку, с которым он взаимодействует (фиг. 16,1).

Тогда

$$Q_t = I_м \cdot B l_n \sin \omega t \sin(\omega t - \varepsilon),$$

среднее значение за период

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T Q_t\,dt = \frac{I_м B \cdot l_n}{T}\int_0^T \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varepsilon)\,dt.$$

Значение

$$\int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \varepsilon)\,dt = \frac{T}{2}\cos \varepsilon.$$

Тогда

$$Q = \frac{I_м B l_n}{2}\cos \varepsilon.$$

Фиг. 16, 1. Векторная диаграмма.

Учитывая, что действующее значение тока $I = \frac{I_м}{\sqrt{2}}$, а также — $1\,\frac{дж}{см} = 10{,}2\ кГ$, получим

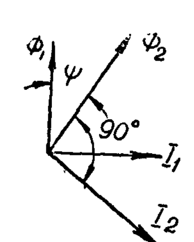
$$Q = 7{,}2 \cdot I B l_n \cos \varepsilon\ кГ, \qquad (16\text{-}1)$$

где B — $\frac{вб}{см^2}$; l_n — в $см$.

Соотношение (16-1) является основным для вычисления средних значений сил на роторе.

16-2. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ МОМЕНТОВ

Рассмотрим индукционную систему с полюсами P_1 с полем Φ_1, и P_2 — с полем Φ_2 (фиг. 16,2). Значения токов трансформации в роторе — I_1 и I_2; ψ — угол между векторами потоков. Моменты на роторе определяются взаимодействием поля Φ_1 и тока I_2, а также поля Φ_2 и тока I_1.



Фиг. 16, 2. Векторная диаграмма.

Значение токов трансформации $I_1 = k_2 \Phi_1$; $I_2 = k_3 \Phi_2$. Тогда общий момент на роторе

$$M = M_1 + M_2 = k_p \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi. \qquad (16\text{-}2)$$

Необходимо обратить внимание на знаки моментов M_1 и M_2; мгновенные значения M_{1t}, M_{2t} могут быть разных знаков, но среднее за период значение M_1 и M_2 одного и того же знака. Поэтому при определении суммарного момента складывают значения составляющих моментов.

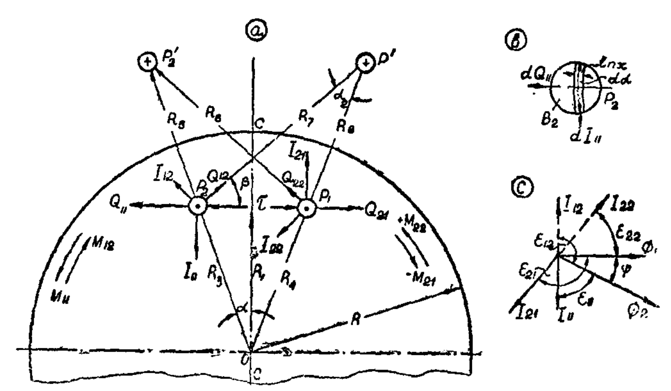
По формуле (16-2) нельзя судить о направлении вращения ротора, обычно его определяют по следующему мнемоническому правилу: ротор вращается в сторону от полюса с опережающим потоком к полюсу с отстающим.

В соответствии с диаграммой, приведенной на фигуре (16-2), ротор вращается от полюса P_1 (поле Φ_1) к полюсу P_2 (поле Φ_2).

Вычисление рабочих моментов на диске экранированной системы

1. Момент M_{11}. Элементарное значение силы, определяемое током I_{11} полюса P_1 и полем Φ_2 полюса P_2 (фиг. 16-3) согласно формуле (16-1):

$$dQ_{11} = 7{,}2\, d\dot{I}_{11} B_2 l_{nx} \cos \varepsilon_{11} \ (a).$$



Фиг. 16, 3. Моменты на диске экранированной системы.

Элементарное значение объема диска под полюсом $\Delta d\alpha$. Тогда

$$dI_{11} = j_{11} \Delta d\alpha \ (b).$$

Согласно (15-4)

$$j_{11} = 1{,}2 \cdot 10^7 \frac{\Phi_1}{\tau} \ (c); \quad \cos \varepsilon_{11} = \sin \psi \ (d).$$

Из (a, b, c, d)

$$dQ_{11} = 8{,}65 \cdot 10^7 \frac{\Phi_1}{\tau} B_2 \Delta \sin \psi \, l_{nx} \, d\alpha;$$

$$Q_{11} = \int dQ_{11} = 8{,}65 \cdot 10^7 \frac{\Phi_1}{\tau} B_2 \Delta \sin \psi \int\limits_{S_2} l_{nx} \, d\alpha.$$

Согласно фигуре 16,3 b:

$$\int\limits_{S_2} l_{nx} \, d\alpha = S_2; \quad B_2 S_2 = \Phi_2.$$

Окончательно

$$Q_{11} = 8{,}65 \cdot 10^{10} \Phi_1 \Phi_2 \frac{\Delta}{\tau} \sin \psi \ \ \Gamma. \qquad (16\text{-}3$$

$$M_{11} = Q_{11} R_1 \ \ \Gamma см.$$

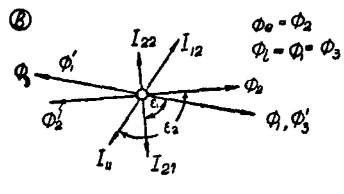
II. Момент M_{12}, определяемый током, индуктируемым полем воображаемого полюса P_1' и полем Φ_2 полюса P_2:

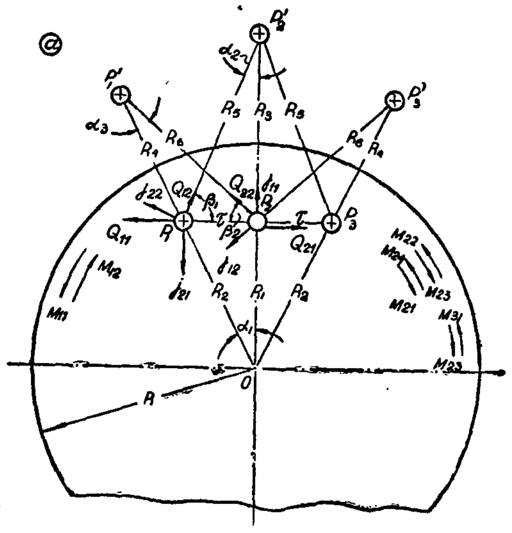
$$Q_{12} = 8{,}65 \cdot 10^{10} \Phi_1 \Phi_2 \frac{\Delta}{R_7} \sin\psi;$$

$$M_{12} = Q_{12} R_1 \cos\beta.$$

III. Момент M_{21}, определяемый током, индуктируемым полем полюса P_2 и полем Φ_1 полюса P_1:

$$Q_{21} = 8{,}65 \cdot 10^{10} \Phi_1 \Phi_2 \frac{\Delta}{\tau} \sin\psi; \quad M_{21} = Q_{21} R_1.$$





Фиг. 16, 4. Моменты на диске тангенциальной системы.

IV. Момент M_{22} — определяемый током, индуктируемым полем воображаемого полюса P_2' и полем полюса P_1:

$$Q_{22} = 8{,}65 \cdot 10^{10} \cdot \Phi_1 \Phi_2 \frac{\Delta}{R_8} \sin\psi;$$

$$M_{22} = Q_{22} R_1 \cos\beta.$$

V. Суммарный момент M является суммой моментов, определяемых основными полюсами (M_{11}; M_{21}), за вычетом моментов, определяемых воображаемыми полюсами (M_{12} и M_{22}):

$$M = 2 \cdot 8{,}65 \cdot 10^{10} \Phi_1 \Phi_2 R_1 \Delta \left(\frac{1}{\tau} - \frac{\cos\beta}{R_6}\right) \sin\psi. \qquad (16\text{-}4)$$

VI. Значения отдельных величин. Заданными являются R_1, τ, R, остальные значения определяют из геометрических соотношений:

а) Расположение воображаемых полюсов P_1' и P_2'

$$R_3 (R_3 + R_5) = R^2; \quad R_5 = R_8,$$

б) $R_6 = R_7$; R_6 определяем из треугольника $P_1 P_2' O$; $\cos\beta$ — из треугольника $P_1 P_2 P_1'$.

VII. Значение k_p определяем из выражения (16-2)

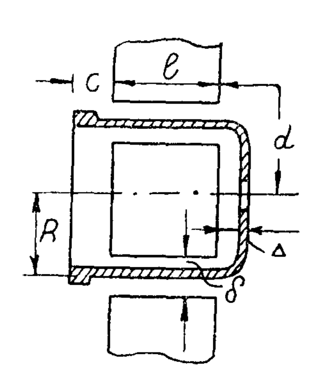
$$M = k_p \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi.$$

Учитывая (16-4), получаем

$$k_p = 17{,}3 \cdot 10^{10} \cdot \Delta R_1 \left(\frac{1}{\tau} - \frac{\cos\beta}{R_6}\right). \qquad (16\text{-}5)$$

Пример. Вычислить значение k_p для экранированной дисковой системы.

Задано: $R = 4{,}8$ *см*; $\Delta = 0{,}1$ *см*; $\tau = 1{,}1$ *см*; $R_1 = 3{,}14$ *см*.



Фиг. 16, 5. Разрез магнитной системы.

Данные вычислений:
$R_3 = 3{,}2$ *см*; $R_5 = R_8 = 4$ *см*;
$R_6 = R_7 = 4{,}3$ *см*; $\cos\beta = 0{,}393$.

Подставляя полученные значения в (16-5), имеем $k_p = 4{,}44 \cdot 10^{10}$.

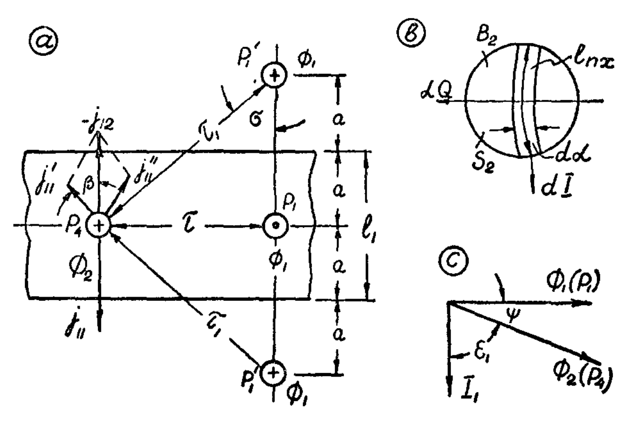
Если известны Φ_1, Φ_2, ψ, то момент на диске определяют по формуле (16-2);

Пример. $\Phi_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ *вб*; $\Phi_2 = 1 \cdot 10^{-5}$ *вб*; $\psi = 45°$;

$$M = 4{,}44 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}707 = 6{,}26 \text{ Гсм}.$$

Вычисление рабочих моментов на диске тангенциальной системы

1. Моменты на диске. Вычисление сил производят по формуле (16-3). Силы, определяемые индуктированными токами основных полюсов (P_1, P_2 и P_3), считаем положительными, а воображаемых — отрицательными (фиг. 16,4).



Фиг. 16, 6. Развертка системы и диаграммы.

Полюс	Величины, определяющие силу		Момент	Знак момента
	Поток	Ток, индуктир. потоком полюса		
P_1	Φ_1	P_2	$M_{11} = 8{,}65 \cdot 10^{10}\, \Delta\, \Phi_1 \Phi_2\, R_1 \frac{1}{\tau} \sin\psi$	+
		P'_2	$M_{12} = 8{,}65 \cdot 10^{10}\, \Delta \Phi_1 \Phi_2 \frac{R_1 \cos\beta_1}{R_5} \sin\psi$	—
P_2	Φ_2	P_1	$M_{21} = M_{11}$	+
		P'_1	$M_{22} = 8{,}65 \cdot 10^{10}\, \Delta \Phi_1 \Phi_2 \frac{R_1 \cos\beta_2}{R_6} \sin\psi$	—
P_2	Φ_2	P_3	$M_{31} = M_{21} = M_{11}$	+
		P'_3	$M_{32} = M_{22}$	—
P_3	$\Phi_3 = \Phi_1$	P_2	$M_{33} = M_{11}$	+
		P'_2	$M_{32} = M_{12}$	—

Суммарный момент $M = 4M_{11} - 2M_{12} - 2M_{22}$.

$$M = 17{,}3 \cdot 10^{10} \Phi_1 \Phi_2 \Delta \cdot R_1 \left(\frac{2}{\tau} - \frac{\cos\beta_1}{R_5} - \frac{\cos\beta_2}{R_6} \right) \sin\psi \quad \textit{Гсм}.$$

Здесь Φ_1 и Φ_2 — в веберах, линейные размеры в *см*.

$$k_p = 17{,}3 \cdot 10^{10} \Delta R_1 \left(\frac{2}{\tau} - \frac{\cos\beta_1}{R_5} - \frac{\cos\beta_2}{R_6} \right). \qquad (16\text{-}6)$$

Определение значений R_5, R_6, $\cos\beta_1$, $\cos\beta_2$ производится аналогично показанному выше.

Вычисление рабочих моментов на роторе барабанной системы

I. Развернутая длина ротора

$$l_1 = c_1 + d_1 + l,$$

где c_1, d_1 — приведенные к размеру Δ, размеры c и d (фиг. 16,5).

II. M_{12} — момент, определяемый взаимодействием поля Φ_2 полюса P_2 (фиг. 16,6) и тока I_1, индуктированного в роторе полем Φ_1, полюса P_1.

а) Плотности токов:

$$j_{11} = 1{,}2 \cdot 10^7 \frac{\Phi_1}{\tau}; \quad j_{11}' = j_{11} = -1{,}2 \cdot 10^7 \frac{\Phi_1}{\tau_1};$$

$$j_{12} = j_{11}' + j_{11}'' = -2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^7 \frac{\Phi_1}{\tau_1} \cos\beta; \quad \cos\beta = \sin\sigma = \frac{\tau}{\tau_1};$$

$$j_1 = j_{11} - j_{12} = 1{,}2 \cdot 10^7 \Phi_1 \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2\tau}{\tau_1^2}\right).$$

Обозначим

$$c_2 = \frac{1}{\tau} - \frac{2\tau}{\tau_1^2};$$

тогда

$$j_1 = 1{,}2 \cdot 10^7 c_2 \Phi_1.$$

б) Сила. Элементарное значение силы согласно (16-1, см. фиг. 16-6),

$$dQ = 7{,}2 dI_1 B_2 l_{nx} \cos\varepsilon;$$

элементарный объем ротора под полюсом $\Delta d\alpha$.

$$dI_1 = j_1 \Delta d\alpha = 1{,}2 \cdot 10^7 c_2 \Phi_1 \Delta d\alpha; \quad \cos\varepsilon = \sin\psi;$$

$$Q = 8{,}65 \cdot 10^7 c_2 \Delta \cdot \Phi_1 \sin\psi B_2 \int_{S_2} l_{nx} d\alpha \quad кГ.$$

$\int_{S_2} l_{nx} d\alpha = S_2$ — площади кругового полюса P_2; $B_2 S_2 = \Phi_2$, тогда

$$Q_{12} = 8{,}65 \cdot 10^{10} c_2 \Delta \cdot \Phi_1 \Phi_2 \cdot \sin\psi \;\; грамм; \quad M_{12} = Q_{12} R_1.$$

III. Суммарный момент на роторе — M. Поле Φ_2, взаимодействуя с током I_3, индуктируемого полем Φ_1 полюса P_3, создает момент $M_{13} = M_{12}$.

Таким образом, момент, создаваемый на каждом полюсе, равен $2M_x$, при числе полюсов n, общий момент $M = 2nM_x$. Поэтому общий момент четырехполюсного реле:

$$M = 8 \cdot 8{,}65 \cdot 10^{10} \Delta \cdot R c_2 \Phi_1 \Phi_2 \cdot \sin\psi.$$

Обозначая

$$k_p = 8 \cdot 8{,}65 \cdot 10^{10} \Delta \cdot R c_2 = 69{,}2 \cdot 10^{10} \Delta R \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2\tau}{\tau^2 + l_1^2}\right),$$

имеем

$$M = k_p \Phi_1 \Phi_2 \sin\psi.$$

Пример. Определить значение k_p для четырёхполюсного реле. Данные реле: $\Delta = 0{,}05$ *см*, $R = 1{,}425$ *см*; $\tau = 2{,}36$ *см*.

$$c_1 = d_1 = 2{,}15 \; см; \; l = 3 \; см; \; f = 50 \; гц.; \; \gamma = 34 \cdot 10^4 \frac{1}{ом \; см}.$$

Условная длина ротора $l_1 = 3 + 2 \cdot 2{,}15 = 7{,}3$ *см*.

$$k_p = 1{,}65 \cdot 10^{10}.$$

Формула Б. К. Буля для вычисления рабочих моментов на диске

1. Общее выражение для момента

$$M = 2 \frac{10{,}2 \Delta f 10^8}{\rho} k \Phi_1 \Phi_2 \sin\psi \quad Гсм.$$

где ρ — удельное сопротивление материала диска, *ом. см.*

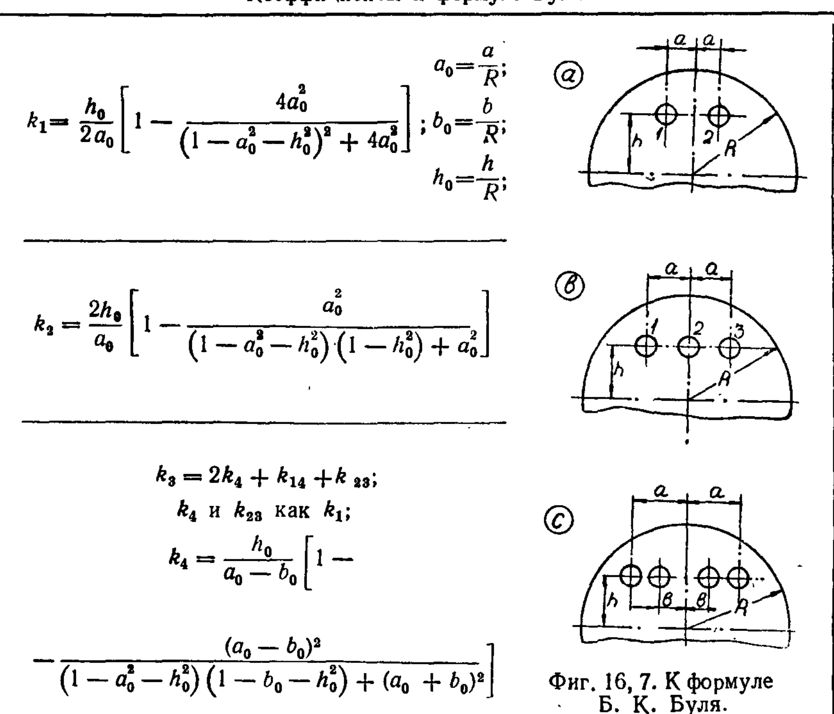
f — частота в *гц*; Φ_1 и Φ_2 — максимальное значение потоков в *вб;*

k — геометрическая постоянная.

Ниже, в таблице, приводятся данные для определения геометрической постоянной.

Таблица 24

Коэффициенты к формуле Буля



$$k_1 = \frac{h_0}{2a_0}\left[1 - \frac{4a_0^2}{\left(1 - a_0^2 - h_0^2\right)^2 + 4a_0^2}\right]; \quad a_0 = \frac{a}{R}; \quad b_0 = \frac{b}{R}; \quad h_0 = \frac{h}{R};$$

$$k_2 = \frac{2h_0}{a_0}\left[1 - \frac{a_0^2}{\left(1 - a_0^2 - h_0^2\right)\left(1 - h_0^2\right) + a_0^2}\right]$$

$$k_3 = 2k_4 + k_{14} + k_{23};$$

k_4 и k_{23} как k_1;

$$k_4 = \frac{h_0}{a_0 - b_0}\left[1 - \frac{(a_0 - b_0)^2}{\left(1 - a_0^2 - h_0^2\right)\left(1 - b_0 - h_0^2\right) + (a_0 + b_0)^2}\right]$$

Фиг. 16, 7. К формуле Б. К. Буля.

Формулы Л. А. Гельбуха для вычисления рабочих моментов на роторе барабанной системы

Л. А. Гельбухом предложена следующая формула для вычисления рабочего момента одной пары полюсов:

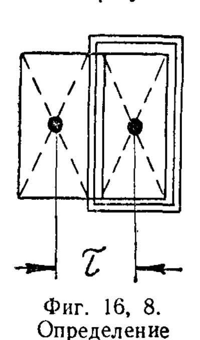
$$M = \frac{4}{981}\,\frac{\omega\gamma\Delta l_1^3 R B_1 B_2}{\pi^4}\sin\psi\sum\frac{1}{k^4}\,\mathrm{sh}^2\frac{k\pi b}{2l_1}\,e^{-\frac{k\pi\tau}{l_1}} \times$$

$$\times\left[\cos\frac{k\pi d_1}{l_1}(-1)^{k+1} + \cos\frac{k\pi c_1}{l_1}\right]^2 \cdot 10^{-5}\ \textit{Гсм}.$$

Здесь B_1, B_2 — индукция в гауссах, k — коэффициент, характеризующий порядок гармоник, b — размер полюсной дуги в *см.* l_1 — условная длина диска ротора, $l_1 = l + c_1 + d_1$; l — длина полюса; $\gamma = 34\,\frac{м}{ом\ мм^2}$.

Общий момент системы: при наличии в системе n полюсов значение момента увеличивается в n раз.

Формула для вычисления тормозного момента одного полюса:



Фиг. 16, 8. Определение полюсного деления.

$$M_\partial = 2{,}04 \cdot \frac{\gamma \Delta \omega l_1^2}{\pi} R^2 B^2 \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1}{k^3} \operatorname{sh} \frac{-k\pi b}{l} e^{-\frac{k\pi b}{2l}} \times$$

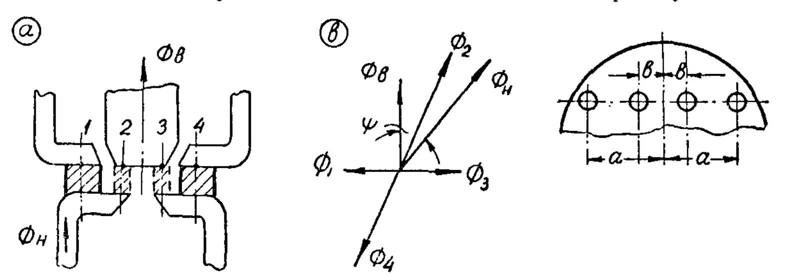
$$\times \left[\cos \frac{k\pi d_1}{l} (-1)^{k+1} + \cos \frac{k\pi c}{l}\right] 10^{-8} \text{ грамм} \cdot \text{см}.$$

Общий тормозной момент равен сумме тормозных моментов отдельных полюсов.

О форме полюсов

Как правило, в имеющихся конструкциях индукционных систем полюсы бывают прямоугольной формы. Однако при выводе формул для расчета рассматриваются точечные или круглые полюсы, благодаря чему значительно упрощается вывод этих формул.

Имеются кривые поправочных коэффициентов, по которым можно учитывать переход от точечных полюсов к прямоугольным.

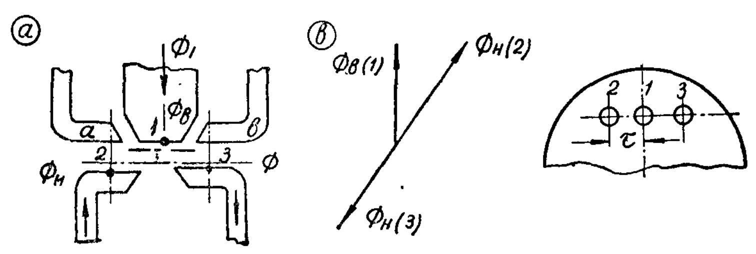


Фиг. 16, 9. Рассмотрение тангенциальной системы в 4-полюсном исполнении.

Соотношение размеров прямоугольных полюсов обычно бывает таким, что значение поправочного коэффициента близко единице.

Полюсное деление

Под полюсным делением τ понимают расстояние между центрами полюсов. Точное значение τ вычисляется в системах с ба-



Фиг. 16, 10. Рассмотрение тангенциальной системы в 3-полюсном исполнении

рабаном, где величина полюсного деления определяется расстоянием по окружности между центрами полюсов.

Несколько сложней решается задача в экранированных системах. Условно считают τ — как расстояние между центрами тяжести фигур, представляющих собой площади полюсов (фиг. 16,8). Еще более сложной является задача установления τ в тангенциальных системах. Сложная картина распределения поля в воздушных зазорах между верхним и нижним магнитопроводами приводит к некоторой неопределенности в установлении центров полюсов.

Б. К. Буль рассматривает такую систему состоящей из четырех условных полюсов (фиг. 16, 9). В каждом из них учитывается действие двух потоков, являющихся частью потоков $\Phi_в$ и $\Phi_н$, причем в одних полюсах эти потоки складываются, в других вычитаются.

В дальнейшем принят другой вариант решения задачи: система принимается состоящей из трех полюсов (фиг. 16, 10):

1 — выходит поток $\Phi_в$;

2 — » » $\Phi_н$;

3 — входит » $\Phi_н$.

При трехполюсном варианте не учитывается то, что в местах (*а*) и (*в*) потоки $\Phi_в$ и $\Phi_н$ суммируются и вычитаются. Это упрощение принято потому, что моменты, определяемые потоками $\Phi_в + \Phi_н$ и $\Phi_в - \Phi_н$, в указанных местах имеют разные знаки и на величину общего момента не влияют. Трехполюсный вариант удобен для анализа и для определения направления вращения ротора при повороте одного из векторов поля на определенный угол.

Сложная картина распределения поля не позволяет точно учитывать значения потоков, протекающих в полюсах системы с четырьмя полюсами. Так, часть потока $\Phi_в$ замыкается не по воздуху, а по скобе *С* (фиг. 14,1). Поэтому приходится проводить экспериментальную проверку расчетов. Такую проверку удобно производить, замеряя отдельно потоки $\Phi_в$ у полюса *1* и $\Phi_н$ у полюсов *2* и *3* и, таким образом, получают непосредственные данные для полей указанных трех полюсов.

Влияние краевого эффекта

Краевой эффект на роторе выражается в том, что в роторе конечных размеров векторы индуктированных токов под соответствующим полюсом отличаются от соответствующих векторов в случае бесконечных размеров ротора.

Как указывалось выше, учет краевого эффекта проводится с использованием воображаемых полюсов, действие которых аналогично действию основных. При этом моменты, определяемые воображаемыми полюсами, вычитают из моментов, определяемых основными.

Влияние удаленных полюсов

Выше показана методика вычисления момента на роторе с учетом взаимодействия полей и токов двух соседних полюсов.

В многополюсных индукционных системах с барабаном следует учитывать дополнительное влияние удаленных, не смежных полюсов. Так, в восьмиполюсной системе (фиг. 14, 5) момент на роторе определяется не только взаимодействием полей полюсов *1—2* и *1—8*, но и несмежных полюсов *1—3*, *1—4* и т. д. Вычисление моментов, определяемых несмежными полюсами, производят по приведенным выше соотношениям. По мере удаления несмежных полюсов соответствующее значение момента уменьшается.

Ниже приводятся экспериментальные данные, полученные для восьмиполюсной системы:

$\alpha°$	45	90	135	180
$M\%$	100	32	5	0

Здесь α — пространственный угол между полюсами. Влияние элементов несмежных полюсов искажает электромагнитную характеристику реле. Поэтому приходится располагать катушки на полюсах системы так, чтобы моменты двух полюсов, смещенных на 90°, взаимно уравновешивались. Например, моменты полюсов *1—5* и *1—7* должны быть равны, но направлены в разные стороны. Значениями моментов полюсов, смещенных на 135°, например *1—4*, пренебрегают.

16-3. ОБЩЕЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТОРМОЗНОГО МОМЕНТА

Тормозные моменты возникают на роторе при его вращении в поле полюсов. Поток Φ полюса индуктирует в диске э. д. с. резания:

$$E_p = \frac{B}{\sqrt{2}} l_n V \text{ вольт,}$$

где

$B = \frac{\Phi}{S}$ — индукция;

l_n — длина под полюсом трубки тока резания;

V — скорость движения ротора в месте, расположенном под полюсом $V = \omega R_1$ *см/сек.*

Ток резания

$$I_p = \frac{E_p}{r} = \frac{1}{\sqrt{2} r} B l_n \omega R_1 \text{ ампер,} \qquad (a)$$

где r — сопротивление расположенной под полюсом трубки тока резания.

Среднее значение тормозной силы для переменного поля

$$Q_\partial = \frac{1}{\sqrt{2}} B I_p l_n \cos \varepsilon \ \frac{дж}{см}, \qquad (b)$$

ε — угол между векторами потока и тока резания. Подставляя

из (a) в (b) значение I_p, учитывая значение плеча силы R_2 и переход от $\frac{дж}{см}$ в $кГ \cdot см$, получаем

$$M_д = \frac{1,02 \cdot 10^4}{2} \frac{\Phi^2}{S^2} \frac{l_n^2}{\tau} R_1 R_2 \omega \cos \varepsilon. \qquad (16\text{-}7)$$

При взаимодействии поля полюса с индуктированным им током резания угол $\varepsilon = 0$.

Обозначая

$$k_д = \frac{1,02 \cdot 10^4 l_n^2 R_1 R_2}{2S^2 r},$$

получаем

$$M_д = k_д \Phi^2 \omega. \qquad (16\text{-}8)$$

Выражение (16-8) является основным для определения момента торможения, которое формулируется так: момент торможения пропорционален квадрату потока и окружной скорости ротора.

В индукционных системах возникают тормозные моменты, определяемые взаимодействием поля Φ_1 одного полюса с током, индуктируемым полем Φ_2 другого полюса.

Если $\angle \Phi_1 \Phi_2 = \psi$, то выражение для $M_д$:

$$M_д = k_д \Phi_1 \Phi_2 \cos \psi. \qquad (16\text{-}9)$$

Пример.

$$\Phi_1 = 1,8 \cdot 10^{-5}\ вб;\ l_n = 1,56\ см;\ R_1 = R_2 = 2,65\ см.$$

$$\omega = 3,62;\ S = 2,84\ см^2.$$

$r = 8,7 \cdot 10^{-5}$ (вычислено графическим методом)

$$M_д = 0,146 \quad Гсм.$$

16-4. ТОРМОЗНЫЕ МОМЕНТЫ РАЗНЫХ СИСТЕМ

Экранированная система. Такая система состоит из двух полюсов с потоками Φ_1 и Φ_2, сдвинутыми по фазе на угол ψ:

$$M_1 = k_{д_1} \Phi_1^2 \omega;\ M_2 = k_{д_2} \Phi_2^2 \omega;\ M_{12} = k_{д_{12}} \Phi_1 \Phi_2 \omega \cos \psi;$$

$$M_{21} = k_{д_{21}} \Phi_1 \Phi_2 \cdot \omega \sin \psi;\ M_д = M_1 + M_2 + M_{12} + M_{21}.$$

Тангенциальная система. Такая система рассматривается состоящей из трех полюсов: среднего с полем Φ_1 и крайних с полем Φ_2, причем $\angle \Phi_1 \Phi_2 = \psi$.

Суммарное значение тормозных моментов, определяемых взаимодействием поля Φ_1 с токами резания I_{p2} и поля Φ_2 с токами резания I_{p1}, равно нулю. Таким образом, необходимо учитывать только тормозные моменты, определяемые полями полюсов с индуктированными ими токами резания.

$$M_д = \left(k_{д1} \Phi_1^2 + 2 k_{д_2} \Phi_2^2\right) \omega\ грамм\ см.$$

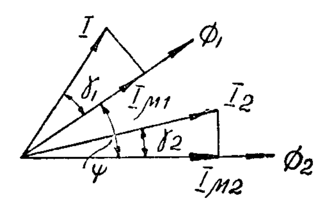
Система с барабаном. Вычисление тормозных моментов проводится по выведенным выше соотношениям (см. параграф 16-3).

Л. А. Гельбух предложил выражение для вычисления значения тормозного момента одного полюса системы с барабаном (см. выше).

Общий тормозной момент многополюсного реле равен сумме тормозных моментов отдельных полюсов.

16-5. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ УРАВНЕНИЙ МОМЕНТОВ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ

Полученные выше уравнения для определения рабочих моментов не всегда удобны для проведения расчетов индукционных систем. Поэтому применяют и другие виды уравнений. Ниже приводятся различные виды уравнений, выражающих значение рабочего момента в функции параметров систем.



Фиг. 16, 11. Векторная диаграмма.

а) Исходное уравнение

$$M = k_p \Phi_1 \Phi_2 \sin\psi \quad (16\text{-}2).$$

б) Уравнение рабочего момента в функции н. с. системы. Если известны проводимости G_1 и G_2 для путей потоков Φ_1 и Φ_2 и углы потерь γ_1 и γ_2, то можно составить следующие соотношения (фиг. 16,11):

$$\Phi_1 = \sqrt{2} \cdot I_{\mu 1} w_1 G_1; \quad (a)$$

$$\Phi_2 = \sqrt{2} \cdot I_{\mu 2} w_2 G_2; \quad (b)$$

$$I_{\mu 1} = I_1 \cos\gamma_1 \quad (c); \quad I_{\mu 2} = I_2 \cos\gamma_2. \quad (d)$$

Подставляя (a, b, c, d) в (16-2) получаем

$$M = 2k_p G_1 G_2 I_1 w_1 I_2 w_2 \cos\gamma_1 \cos\gamma_2 \sin\psi. \quad (16\text{-}10)$$

Обозначая

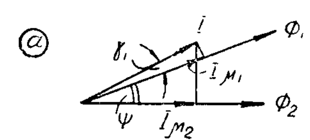
$$k_a = 2k_p G_1 G_2 \cos\gamma_1 \cos\gamma_2,$$

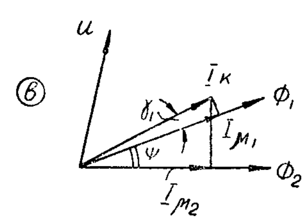
имеем

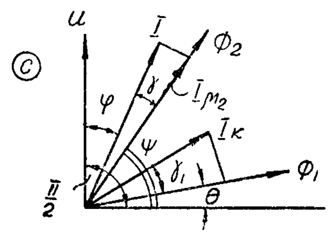
$$M = k_a I_1 w_1 I_2 w_2 \sin\psi. \quad (16\text{-}11)$$

Отметим здесь, что реакция ротора учтена при выводе формулы введением коэффициентов $\cos\gamma_1$ и $\cos\gamma_2$.

в) Уравнение рабочих моментов в функции параметров сети[1].







Фиг. 16,12. Векторные диаграмы.

[1] Выводы значений моментов реле тока и напряжения приведены с учетом экранированной системы.

Реле тока. В таких реле оба потока Φ_1 и Φ_2 определяются в функции н. с. катушки реле, проводимости G_1 и G_2 различны для обоих потоков, значение угла ψ остается неизменным при различных режимах работы реле.

Пользуясь диаграммой, изображенной на фигуре 16,12*a*, имеем

$$\Phi_1 = \sqrt{2}\, I w G_1 \cos\gamma_1 \quad (a); \qquad \Phi_2 = \sqrt{2}\, I w G_2 \cos(\gamma_1 + \psi). \qquad (b)$$

Подставляя (*a*) и (*b*) в (16-10), получаем

$$M = 2k_p G_1 G_2 \cdot \cos\gamma_1 \cos(\gamma_1 + \psi)\,(Iw)^2 \sin\psi.$$

Учитывая, что $\sin\psi$ для экранированной системы = *пост.* и обозначая $k_m = 2k_p G_1 G_2 \cos\gamma_1 \cos(\gamma + \psi) \sin\psi \cdot w^2$,

имеем

$$M_m = k_m I^2. \qquad (16\text{-}12)$$

Реле напряжения. Построение реле напряжения аналогично реле тока. Основные соотношения:

$$\Phi_1 = \sqrt{2}\, I_к w \cos\gamma_1 G_1;$$

$$\Phi_2 = \sqrt{2}\, I_к w \cos(\gamma_1 + \psi)\, G_2;$$

$$I_к = \frac{U}{Z_к}.$$

Обозначая

$$k_н = 2k_p \frac{w^2}{Z_к^2} G_1 G_2 \cos\gamma_1 \cdot \cos(\gamma_1 + \psi) \sin\psi,$$

имеем

$$M_н = k_н U^2. \qquad (16\text{-}13)$$

Реле мощности. В таких исполнениях реле имеется катушка напряжения, включаемая на напряжение U сети, катушка тока, через которую протекает ток I сети. Следует учитывать угол φ между векторами U и I. Основные соотношения (фиг. 16, 12*c*):

$$\Phi_1 = \sqrt{2}\, I_к w_1 G_1 \cos\gamma_1;$$

$$\Phi_2 = \sqrt{2}\, I w_2 G_2 \cos\gamma_2;$$

$$I_к = \frac{U}{Z_к};$$

$$\sin\psi = \cos(\varphi + \gamma + \theta) = \cos(\varphi + \alpha).$$

Здесь $\alpha = \gamma + \theta$.

Обозначая

$$k_м = 2k_p \frac{w_1 w_2}{Z_к} G_1 G_2 \cos\gamma_1 \cos\gamma,$$

имеем

$$M_м = k_м U I \cos(\varphi + \alpha) \qquad (16\text{-}14)$$

Формулы (16-12), (16-13) и (16-14) удобны для пользования при расчете различных исполнений реле. Коэффициенты k_m, $k_н$ и $k_м$ определяют при проектировании индукционной системы.

В тех случаях, когда при расчете какого-либо исполнения реле получают значения потоков в комплексной форме и непо-

средственное вычисление значения угла ψ неудобно, применяют другое уравнение момента.

Так, если $\dot{\Phi}_1 = M_1 + jN_1$; $\dot{\Phi}_2 = M_2 + jN_2$, то момент на роторе пропорционален мнимой части произведения комплекса одного потока на сопряженный комплекс другого.

Мнимая часть произведения равна $N_1M_2 - M_1N_2$.

Тогда

$$M = k_p(N_1M_2 - M_1N_2).$$

При расчете сложных исполнений реле, например некоторых видов дистанционных, получаются комплексные выражения для токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ — двух катушек реле в функции тока I и напряжения U сети.

Например,

$$\dot{I} = M_1I + M_2U + j(N_1I + N_2U); \qquad (a)$$

$$\dot{I}_2 = M_3I + M_4U + j(N_3I + N_4U). \qquad (b)$$

Значение момента на роторе пропорционально мнимой части произведения комплекса (a) на сопряженный комплекс (b).

Значения потоков выражены в форме

$$\dot{\Phi}_{t1} = \Phi_1 e^{j(\omega t + \alpha)}; \quad \dot{\Phi}_{t2} = \Phi_2 e^{j(\omega t + \beta)}.$$

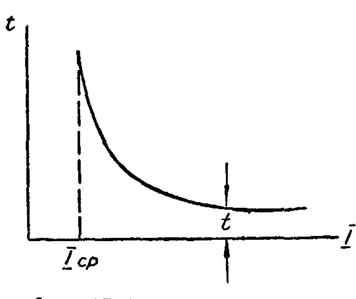
$$M = k_p\Phi_1\Phi_2 \sin(\beta - \alpha).$$

ГЛАВА 17

ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ

17-1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Индукционные реле применяются в основном в схемах релейной защиты электрических установок и должны удовлетворять различным требованиям этих схем в отношении времени срабатывания. Характеристика $t = f(I)$, где I — параметр реле, представляет собой кривую (фиг. 17, 1). Обычно, время t реле относят к независимой части характеристики, т. е. к той части, в которой с увеличением параметра I значение t не изменяется. По условиям работы схем защиты выполняют две группы реле.



Фиг. 17, 1. Временная характеристика реле тока.

а) Быстродействующие, т. е. такие, у которых время срабатывания должно быть минимальным. Практически в различных исполнениях реле минимальное время — в независимой части характеристики — получается порядка 0,02—0,06 секунд.

б) **Замедленно** действующие, т. е. такие, у которых время срабатывания должно быть относительно большим. В исполненных реле время t — в независимой части характеристики — бывает порядка 0,5—10 секунд. Дисковые индукционные системы исполняются как быстродействующие, так и замедленно действующие, барабанные — только быстродействующие.

17-2. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА

Рассмотрим для примера индукционное реле (фиг. 17,2) с магнитной системой *1*, постоянным магнитом *2*, пружиной *3* и контактным рычагом *4*. Полный ход контактного рычага до замыкания контактов определяется углом α.

При вращении ротор находится под воздействием следующих моментов:

рабочего $M_p = k_p \Phi_1 \Phi_2 \sin\psi$;

тормозного переменных токов

$$M_\partial = (k_{\partial_1}\Phi_1^2 + 2k_{\partial_2}\Phi_2^2)\,\omega = k_{\partial n}\omega;$$

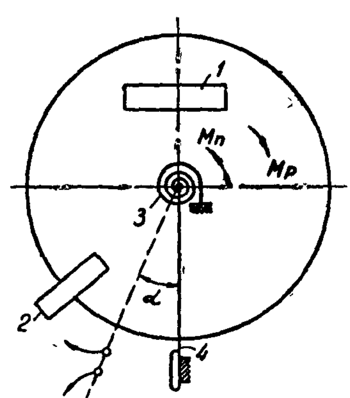
тормозного постоянных магнитов

$$M_{\partial м} = k_{\partial_3} B^2 \omega = k_{\partial м}\omega;$$

момента инерции ротора

$$M_u = J\frac{d^2\alpha}{dt^2};$$

момента противодействующей пружины M_n.



Фиг. 17, 2. Индукционная система.

В дальнейшем принимаются следующие допущения:

не учитывается момент трения, величина которого относительно мала;

противодействующий момент M_n компенсирован так, что при вращении ротора разность $M_p - M_n$ остается постоянной.

По принципу Даламбера

$$M_p = M_u + M_\partial + M_n,$$

или

$$M_p - M_n = J\frac{d^2\alpha}{dt^2} + k_\partial \frac{d\alpha}{dt}. \qquad (17\text{-}1)$$

Здесь принято $k_{\partial n} + k_{\partial м} = k_\partial$; $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$

Решение уравнения (17-1) с учетом начальных условий:

$$\alpha = \frac{M_p - M_n}{k_\partial}\left[t - \frac{J}{k_\partial}\left(1 - e^{-\frac{k_\partial t}{J}}\right)\right]; \qquad (17\text{-}2)$$

$$\omega = \frac{M_p - M_n}{k_\partial}\left(1 - e^{-\frac{k_\partial t}{J}}\right). \qquad (17\text{-}3)$$

Полученные выражения неудобны для анализа влияния на время t параметров системы. Поэтому для практических расчетов принимают следующие упрощения.

а) Значение $k_д \frac{d\alpha}{dt} = 0$; такое упрощение допустимо для быстродействующих реле, так как время t в таких реле настолько мало, что ротор не успевает развивать значительных окружных скоростей. Кроме того, в таких реле отсутствует постоянный магнит.

б) В замедленно действующих реле время разгона ротора до установившейся скорости весьма мало сравнительно с общим временем t. Поэтому принимают

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = 0.$$

17-3. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ РЕЛЕ

Уравнение (17-1) с учетом $k_д \frac{d\alpha}{dt} = 0$ принимает вид

$$M_p - M_n = J \frac{d^2\alpha}{dt^2}.$$

Решение этого уравнения

$$t = \sqrt{\frac{2J\alpha}{M_p - M_n}}. \quad (17\text{-}4)$$

Из (17-4) следует: для уменьшения времени срабатывания значения угла α и момента инерции J вращающихся частей должны быть минимальными. Для уменьшения момента инерции ротора последний выполняют из алюминия.

Время t уменьшается с увеличением рабочего момента. Минимальное значение рабочего момента $M_{p\,мин} = M_n$. Обозначив

$$k = \frac{M_p}{M_{p\,мин}},$$

получаем (17-4) в виде:

$$t = \frac{1}{\sqrt{k-1}} \sqrt{\frac{2J\alpha}{M_n}}.$$

Данные существующего исполнения четырехполюсной системы с барабаном: раствор контактов — 1 *мм*, радиус траверзы — 30 *мм*; $\alpha = 0{,}035$ *рад*.

$J = 88 \cdot 10^{-3}$ *Гсм. сек*^{2}; $M_n = 0{,}35$ *Гсм*,

при $k = 3{,}4$, $t = 0{,}084$ *сек*;

$k = 5{,}1$, $t = 0{,}064$ *сек*;

$k = 30$, $t = 0{,}024$ *сек*.

17-4. ЗАМЕДЛЕННО ДЕЙСТВУЮЩИЕ РЕЛЕ

Из выражения (17-1) с учетом $J\frac{d^2\alpha}{dt^2}=0$ имеем

$$M_p - M_n = k_\partial \frac{d\alpha}{dt}.$$

Решение этого уравнения

$$t = \frac{k_\partial \alpha}{M_p - M_n}. \qquad (17\text{-}5)$$

Из (17-5) следует, что для увеличения t значения k_∂ и α должны быть максимальными. С этой целью в системе ставят постоянные магниты с большой индукцией в зеве магнита (порядка $B = 2 \cdot 10^{-5}$).

ГЛАВА 18

ПАРАМЕТРЫ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Параметрами устройства называют данные, характеризующие определенное исполнение этого устройства. При рассмотрении индукционных систем и реле учитывают следующие основные группы параметров.

Конструктивные, характеризующие конструктивные размеры частей системы: ротора, полюсов и другие. Выбор размеров отдельных частей и соотношений между этими размерами производится из условия получения оптимального решения.

Расчетные, характеризующие расчетные данные рассматриваемого исполнения системы. Расчетные параметры необходимы для расчета определенного вида реле. В таблицах 26 и 27 приведены примерные расчетные данные индукционных систем.

Эксплуатационные, характеризующие работу определенного вида реле: электрические характеристики реле, время срабатывания, потребляемую мощность, коммутационную способность контактной системы и другие.

Ниже рассматриваются отдельные виды параметров.

18-1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

При проектировании индукционной системы выбирают конструктивные размеры такими, чтобы получились наилучшие условия использования активных материалов системы. Исходной величиной является значение k_p — конструктивного коэффициента системы, определяющего собой величину вращающего момента на роторе в функции значений токов катушек.

Основные параметры системы с диском

а) Значение воздушного зазора δ должно быть минимальным, так как при этом условии получаются наибольшие значения потоков в системе при заданном значении намагничивающей силы. Минимальное значение δ принимается из конструктивных соображений так, чтобы при возможных отклонениях в размерах магнитной системы диск, вращаясь, не касался магнитопровода.

Обычные параметры систем с диском: толщина материала диска — 1 *мм*, расстояние от диска до магнитопровода в обе стороны по 0,5 *мм*, $\delta_{мин} = 2$ *мм*.

б) оптимальное значение угла ψ для экранированных систем получается при $\psi = 45°$. Так, выражая значение $M_p = k_p\Phi_1\Phi_2 \sin\psi$ в функции н. с. катушки, получаем

$$M_p = k_p 2mI^2w^2G_1G_2 \cos\psi \sin\psi.$$

Здесь m — постоянная, определяемая реакцией ротора и потерями в стали.

Максимальное значение произведения $\cos\psi \sin\psi$ получается при угле $\psi = 45°$.

в) Размеры полюсов и их расположение характеризуются следующими параметрами:

$$\alpha = \frac{R_n}{R},$$

R_n — радиус полюса; R — радиус диска;

$$\beta = \frac{\tau}{R},$$

τ — расстояние между центрами полюсов (полюсное деление);

$$\eta = \frac{R_1}{R},$$

R_1 — расстояние от линии центров полюсов до центра диска.

На основании ряда проведенных расчетов получены следующие данные для оптимальных значений:

$$\alpha = 0{,}1;\ \beta = 0{,}15;\ \eta = 0{,}75.$$

Основные параметры системы с барабаном

а) Значение δ воздушного зазора между полюсом и сердечником также принимается из конструктивных соображений.

Пример исполнения системы с барабаном (фиг. 18, 1):

Δ барабана равна 0,5 *мм*.

$$\delta = \frac{38{,}5 - 36{,}5}{2} = 1 \text{ мм}.$$

Размеры $D_н$ и D_c исполняются по третьему классу точности, посадка C_8.

Верхний предел отклонения в размере зазора получается равным 0,05 *мм*.

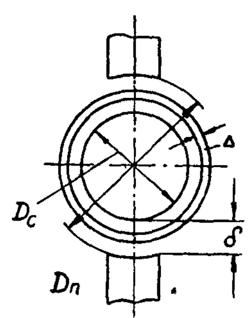
Следует отметить, что выполнение системы с зазором $\delta = 1$ *мм* связано с технологическими трудностями. Поэтому часто исполняют системы, в которых $\delta = 2$ *мм*.

б) Размеры полюсов и их расположение характеризуются следующими параметрами:

$$\alpha = \frac{b}{l_1} = \frac{\text{длина полюсной дуги}}{\text{длина барабана}};$$

$$\beta = \frac{l}{l_1} \frac{\text{длина полюса}}{\text{длина барабана}};$$

$$\eta = \frac{b}{\tau} = \frac{\text{длина полюсной дуги}}{\text{полюсное деление}}.$$



Фиг. 18, 1. Размеры частей магнитной системы.

Для определения оптимальных значений α, β, η значение k_p приводят к виду

$$k_p = \alpha(\alpha); \; k_p = \beta(\beta); \; k_p = \eta(\eta).$$

Принимая различные значения α, β и η, строят кривые и находят оптимальное решение.

По данным ряда расчетов оптимальное значение находится в пределах $\alpha = 0{,}3 \div 0{,}4$.

Значение β в исполненных системах:

4-полюсная $\beta = 0{,}625$; 8-полюсная $\beta = 0{,}316$.

18-2. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Расчетные параметры вычисляются при проектировании индукционной системы и уточняются экспериментальной проверкой. Основные расчетные параметры:

Магнитные проводимости G для потоков системы. Вычисляют значения проводимостей для потоков рабочего и рассеяния.

Определяют значение коэффициента рассеяния полюсов

$$\sigma = \frac{G_p + G_{yc}}{G_p},$$

где G_{yc} — приведенное значение коэффициента рассеяния.

Углы потерь. Вычисляют значение γ для каждой группы полюсов. В исполненных системах, как правило, значение γ одинаково для всех групп полюсов. Так, в тангенциальной системе значение $\gamma_в$ — верхнего магнитопровода равно $\gamma_н$ — нижнего.

Коэффициенты сопротивлений. Катушки каждого из полюсов системы характеризуются значениями коэффициентов сопротивлений: k_r — электрического, k_x — индуктивного, k_z — полного. Пользуясь этими значениями, можно определить все параметры катушки в функции числа ее витков.

Сопротивления: $r = k_r w^2$; $x = k_x w^2$; $z = k_z w^2$.

Потребляемая мощность $P = k_z (Iw)^2$ вольт-ампер.

Н. с. катушки $F = \frac{U}{k_z w}$ ампер-витков.

Вычисление k_r. Исходные соотношения:

$$r = \rho \frac{l_c \cdot 10^{-3}}{q} w \quad (a); \qquad q = f_k \frac{l_k \cdot h_k}{w} \quad (b),$$

или

$$r = \rho \frac{l_c \cdot 10^{-3}}{f_k \cdot l_k h_k} w^2 = k_r w^2.$$

Здесь ρ — для нагретой меди; l_c, l_k, h_k — в *мм*;

f_k — в предварительных расчетах принимают $f_k = 0{,}5$.

Вычисление k_x: $x = \omega L = \omega w^2 G = \omega w^2 \sigma G_p = k_x w^2$.

Здесь G_p — проводимость для рабочего потока;

σ — коэффициент рассеяния полюса.

Коэффициенты моментов. Вычисляют значения k_p, $k_н$, k_m, $k_м$ (см. параграф 16—5), которыми пользуются при расчете отдельных исполнений реле.

Термическая устойчивость. Для отдельных катушек полюсов вычисляют предельное значение допустимой из условий нагрева намагничивающей силы.

Исходное соотношение

$$P = \mu S \theta, \qquad (a)$$

где P — суммарные потери, определяющие собой нагрев катушки и состоящие из электрических потерь в катушке и потерь на гистерезис и вихревые токи ($P_п$). Обычно значение P учитывают с повышенным значением коэффициента k_r. Принимают

$$P = k_r' (Iw)^2; \qquad (b)$$

μ — коэффициент теплоотдачи катушки;

θ — предельное значение превышения температуры катушки. Для индукционных реле принимают $\theta = 60° \div 65°$.

Из (a) и (b)

$$I^2 k_r' w^2 = \mu S \theta,$$

или

$$(Iw)_{пр} = \sqrt{\frac{\mu S \theta}{k_r'}}. \qquad (18\text{-}1)$$

При выборе сечения провода для катушки тока следует учитывать значение кратности тока короткого замыкания. Так, при кратности, равной 50, сечение провода принимают таким, чтобы при $I_{кз} = 50 I_н$ и времени протекания тока 1 *сек*, предельный нагрев меди обмотки не превосходил температуры 200°.

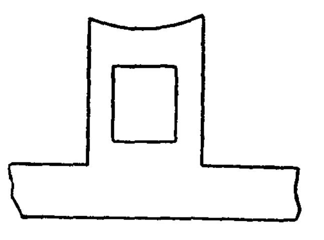
Таким образом, необходимо вычислять два значения термической устойчивости токовых катушек: номинальное, с учетом превышения температуры не более 65°, и односекундное, с предельным нагревом обмотки меди 200°.

Динамическая устойчивость. Предел динамической устойчивости определяется допустимыми вибрациями ротора. Некоторая

незначительная вибрация всегда наблюдается в системе, но при больших токах и напряжениях, подведенных к катушкам реле, вибрация усиливается настолько, что может привести к порче подшипников. Кроме того, сильные вибрации нарушают правильность работы реле и создают неприятное для слуха дребезжание.

Динамическая устойчивость определенной системы устанавливается экспериментально и характеризуется предельным значением ампер-витков катушек реле, допустимых для этой системы.

В обычных исполнениях индукционных систем предельное значение н. с. F_T катушек напряжения, допустимое из условий термической устойчивости, меньше значения н. с. $F_д$ — допустимого из условий динамической устойчивости. Так, при проведенных испытаниях реле с четырехполюсной барабанной системой получены следующие данные: катушка напряжения: $F_T = 450$; $F_д = 500$; катушка тока: F_T — длительные — 450; $F_д = 500$.



Фиг. 18, 2. Полюс с вырезом.

Таким образом, в данной системе $F_T < F_д$, и предельное значение н. с. выбирают, исходя из условий термической устойчивости. При этом следует учесть, что в полюсах с катушкой тока возникают при режимах короткого замыкания значительные потоки, приводящие к вибрации ротора. Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы сталь полюсов с катушкой тока насыщалась уже при 500 *ав*. Достигают этого путем вырезов в жестях полюсов.

На фигуре 18, 2 приведен пример такого исполнения. Ширина выреза выбрана такой, чтобы в узкой части полюса индукция была порядка $1{,}5 \cdot 10^{-5}$, при н. с. катушки, равной 500.

Данные системы: сечение стали полюса $q = 4{,}5$ *см*²; поток полюса, при $F = 500$, $\Phi = 16 \cdot 10^{-5}$ *вб*; сечение полюса в узкой части $q_1 = 1$ *см*².

Добротность. Основным конструктивным параметром, характеризующим степень использования данного вида реле, считается коэффициент добротности $k_{дб}$ или, как говорят, «добротность» системы. При оценке системы учитывают две основные величины:

а) моменты на роторе, определяющие работу контактной системы, а также чувствительность системы;

б) потребляемую мощность катушек, определяющую нагрузку измерительных трансформаторов.

Поэтому для оценки качества индукционной системы принята та же формула, что и для асинхронных двигателей с коротко замкнутым ротором:

$$k_{дб} = \frac{\text{пусковой момент}}{\text{потребляемая мощность при пуске}}.$$

Для индукционной системы значение $k_{дб}$ характеризует момент при 1 *ва* потребляемой мощности катушек:

$$k_{дб} = \frac{M}{ва} \quad \frac{Гсм}{ва}.$$

Для определения значения $k_{дб}$ надо выразить значение $M_p = k_p \Phi_1 \Phi_2 \sin\psi$ в функции потребляемой мощности катушек.

Найдем зависимость Φ_1 и Φ_2 от потребляемой мощности системы.

а) Полюс с катушкой тока

$$\Phi = \sqrt{2} \cdot IwG \cos\gamma. \qquad (a)$$

Падение напряжения на катушке тока

$$U_k = \frac{\omega \Phi w}{\sqrt{2}}. \qquad (b)$$

Потребляемая мощность катушки тока из (*a*), (*в*)

$$UI = \frac{\omega}{2G \cos\gamma} \Phi^2,$$

или

$$\Phi = \sqrt{\frac{2G}{\omega}} \sqrt{UI}. \qquad (c)$$

б) Полюс с катушкой напряжения

$$U = \frac{\omega \Phi w}{\sqrt{2}}; \quad I_k = \frac{U}{\omega w^2 G} = \frac{\Phi}{\sqrt{2} wG},$$

или

$$\Phi = \sqrt{\frac{2G}{\omega}} \sqrt{UI}. \qquad (d)$$

Пользуясь (*c*) и (*d*), можно найти значение $k_{дб}$.

а) Экранированная система с катушкой тока: проводимости полюсов G_1 и G_2; $\sin\psi = пост. = k_1$.

$$k_{дб} = k_p \cdot k_1 \frac{2 \cos\gamma}{\omega} \sqrt{G_1 G_2};$$

$$M = k_{дб} UI.$$

Такое же значение $k_{дб}$ получается и для экранированной системы с катушкой напряжения.

б) Реле с двумя катушками питания, например реле мощности. Поток Φ_1 определяется током I сети, поток Φ_2 — напряжением U сети; угол ψ переменный.

$$k_{дб} = k_p \sqrt{\frac{2G_1 \cos\gamma_1}{\omega}} \sqrt{\frac{2G_2}{\omega}};$$

$$M = k_{дб} \sqrt{U_к I} \sqrt{U I_k} \sin\psi.$$

Из выражения для $k_{дб}$ видно, что сущность создания реле с высокой добротностью заключается в получении большего вращающего момента при том же потреблении катушек в вольт-ам-

перах. Высокие значения $k_{\partial б}$ получают при правильном подборе всех соотношений магнитной системы.

В тангенциальных системах большую роль играют конфигурации верхнего и нижнего магнитопровода, расстояние между полюсами, расстояние полюсов от центра; в экранированных — геометрические размеры экрана; в барабанных — размеры полюсных делений, размеры барабана; во всех видах систем — соотношение между толщиной материала ротора и величиной зазора. Степень использования различных видов индукционных систем и исполнений этих видов характеризуется значением $k_{\partial б}$. Тангенциальные системы имеют значение $k_{\partial б}$ порядка $5 \frac{Гсм}{ва}$;

Чебоксарским аппаратным заводом были проведены исследования для определения коэффициента добротности индукционных систем барабанного типа. Измерения проводились в четырехполюсном реле разных видов. Полученные данные приведены в таблице.

Таблица 25

Значения коэффициентов добротности

Зазор δ *мм*	Толщина ротора Δ *мм*	Материал магнитопровода	$k_{\partial б}$ $\frac{Гсм}{ва}$
2	0,5	Э4	7,9
1	0,5	Э4	12,4
1	0,4	ХВП	14,3

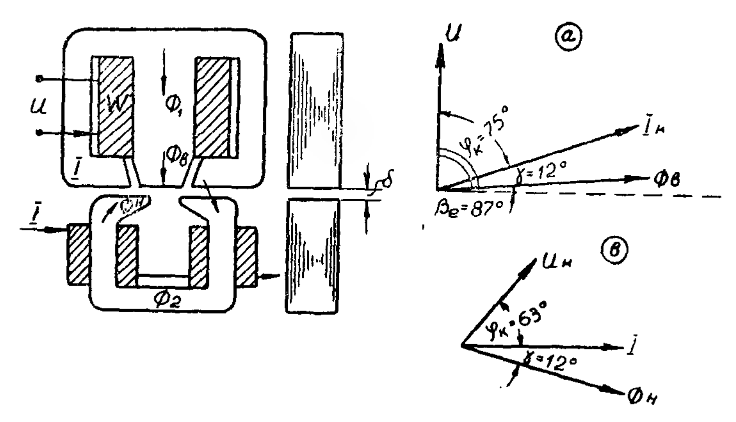
По расчетным данным индукционное восьмиполюсное реле имеет значение $k_{\partial б} = 6{,}6 \frac{Гсм}{ва}$.

Таблица 26

Примерные значения параметров тангенциальной системы[1]

Наименование параметра		Магнитопровод верхний	Магнитопровод нижний
Магнитная проводимость *вб/ав*	потока Φ_1	$G_1 = 5{,}1 \cdot 10^{-7}$	—
	потока Φ_2	—	$G_2 = 1{,}54 \cdot 10^{-7}$
	потоков $\Phi_в$, $\Phi_н$	$G_в = 1{,}5 \cdot 10^{-7}$	$G_н = 0{,}8 \cdot 10^{-7}$
Коэффициенты катушек	омический, с учетом потерь в стали	$k_r = 43{,}5 \cdot 10^{-6}$	$k_r = 31 \cdot 10^{-6}$
	индуктивный	$k_x = 162 \cdot 10^{-6}$	$k_x = 61 \cdot 10^{-6}$
	полного сопротивления	$k_z = 168 \cdot 10^{-6}$	$k_z = 68 \cdot 10^{-6}$
Углы	полного сопротивления	$\varphi_k = 75°$;	$\varphi_k = 63°$
	потерь	$\gamma = 12°$;	$\gamma = 12°$
Допустимое значение и. с.	по тепловому режиму ($\theta = 60°$)	$F = 610$ *ав*;	$F = 670$ *ав* (для обеих катушек)
	по динамической устойчивости	$F = 500$ *ав*;	$F = 670$ *ав*

[1] См. фигуру 18, 3.



Фиг. 18, 3. Эскиз магнитопровода и векторные диаграммы.

Таблица 27

Примерные значения параметров барабанной системы[1]

Наименование параметра	Значение параметра
Магнитные проводимости с учетом реакции ротора $\frac{вб}{ав}$	для потоков ярма (Φ_{11}; Φ_{12}) $G_{11} = 3{,}14 \cdot 10^{-7}$ для потоков полюсов (Φ_1; Φ_2) $G_1 = 2{,}16 \cdot 10^{-7}$
Коэффициенты рассеяния	$\sigma_1 = \frac{\Phi_{11} + \Phi_{12}}{\Phi_1} = 1{,}45$; $\sigma_2 = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_2} = 1{,}3$
Коэффициенты катушек	для двух последовательно включенных катушек ярма ($2w_1$) $k_z = 147 \cdot 10^{-6}$ для двух последовательно включенных катушек полюсов $k_z = 108 \cdot 10^{-6}$.
Угол полного сопротивления	$\varphi_к = 54 \div 55°$
Термическая устойчивость	для $2w_1$ и $2w_2$ $F = 450 \div 500$ *ав*
Динамическая устойчивость	$F = 490$ *ав*

[1] См. фигуру 14,4.

ГЛАВА 19

ПРИМЕРЫ ИСПОЛНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ РЕЛЕ

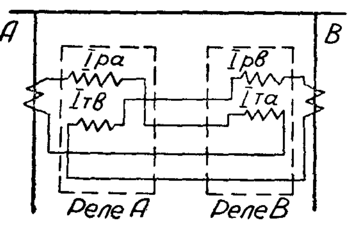
19-1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТОКОВЫЕ РЕЛЕ

Дифференциальные токовые реле действуют в функции разности двух токов

$$M_T = k_T (I_1 - I_2).$$

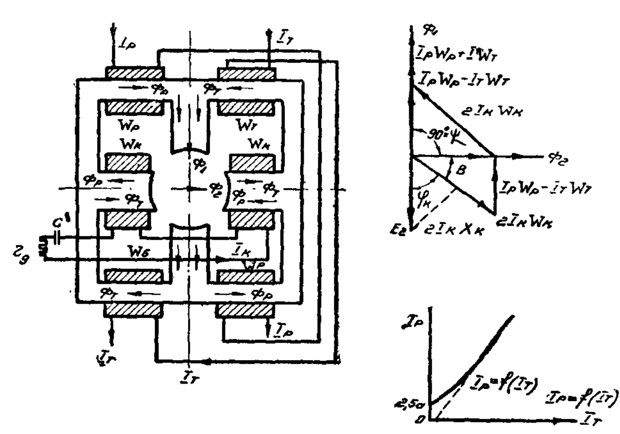
В СССР выпускают ряд таких реле для дифференциальной защиты линий и трансформаторов.

Дифференциальные реле имеют две группы катушек: первая питается током I_p, который называется рабочим током, так как величина его определяет собой рабочий момент на роторе, вторая питается током I_T, который называется тормозным, так как величина его определяет собой тормозной момент.



Фиг. 19,1. Схема включения дифференциального токового реле.

Для пояснения сказанного рассмотрим схему, изображенную на фигуре 19, 1. От общих шин отходят две питающие линии. В каждой линии установлено дифференциальное реле, действие которого должно быть в функции разности токов ($I_p - I_T$), где I_p — ток защищаемой линии, а I_T — второй.



Фиг. 19, 2. Магнитная система и векторная диаграмма.

Электромагнитная характеристика реле, называемая тормозной, оказана на фигуре 19, 2: при $I_T = 0$, ток I_{p0} должен быть опре-эленным — порядка $2 \div 4\ a$, при наличии тормозного тока дейст-ие реле огрубляется. Степень огрубления реле выражается в

процентах. Так, при 30-процентной характеристике отношение $I_p/I_T = 1{,}3$.

Ниже приводятся общие соотношения для расчета дифференциального токового реле для защиты линий электропередач. Схема включения катушек, векторная диаграмма и характеристика реле показаны на фигуре 19, 2.

Определить параметры реле при заданных величинах: $M_{no} = 0{,}35$ *Гсм*; ток срабатывания — $I_{po} = 2{,}5\ a$ при $I_T = 0$; $I_p/I_T = 1{,}3$.

I. Принятые упрощения: полагаем угол $I_p I_T = \alpha = 0$. Для получения максимального значения M_p принимаем $\psi = 90°$; векторы Φ_1 и Φ_2 принимаем совпадающими с н. с. катушек, так как углы потерь γ_1 и γ_2 приближенно равны. Тогда угол $\dot{\Phi}_1\dot{\Phi}_2$ равен углу $\dot{I}_1\dot{I}_2$;

II. Принята 4-полюсная система. Известны параметры

$$k_p,\ \sigma,\ G,\ k_z,\ k_x,\ \gamma.$$

III. Общее уравнение момента

$$\Phi_1 = \sqrt{2}(I_p w_p + I_T w_T)\, G \cos\gamma; \qquad (a)$$

$$\Phi_2 = \sqrt{2}(I_p w_p - I_T w_T + 2I_\kappa w_\kappa)\, G \cdot \cos\gamma. \qquad (b)$$

Из фигуры 19,2

$$I_p w_p - I_T w_T + 2I_\kappa w_\kappa = \frac{I_p w_p - I_T w_T}{\operatorname{tg}\theta}. \qquad (c)$$

$$\sin\psi = 1, \qquad (d)$$

тогда

$$M_p = 2k_p G^2 \cos^2\gamma\, (I_p w_p + I_T w_T)(I_p w_p - I_T w_T)\frac{1}{\operatorname{tg}\theta}.$$

Учитывая, что угол θ остается постоянным при всех таких катушках, имеем

$$M_p = k_a\left(I_p^2 w_p^2 - I_T^2 w_T^2\right)\ Гсм,$$

где

$$k_a = 2k_p G^2 \cos^2\gamma\, \frac{1}{\operatorname{tg}\theta}.$$

IV. Установление угла θ.

Для увеличения M_p стремятся к уменьшению θ. Ограничивающие условия: 1) значение емкости c, определяющей собо $\varphi_\kappa = 90 - \theta$; принимают $c = (4 \div 6)\,\mu F$ с таким расчетом, чтоб конденсатор можно было встроить в корпус реле; 2) электрическое сопротивление катушек контура θ принимают $45 \div 55$'

V. Число витков катушек контура — w_κ. r_1 — сопротивление одной катушки; r_∂ — добавочное, для настройки контура; $r_\partial \cong 0{,}5r_1$.

Тогда

$$r_к = 2r_1 + r_д = 2{,}5k_r w_к^2;$$

$$L_1 = w_к^2 G_{ус}; \quad x_к = \frac{1}{\omega C} - 4\omega w_к^2 G_{ус}.$$

$$Z_к = \sqrt{r_к^2 + x_к^2}; \quad I_к = \frac{E_к}{Z_к} = \frac{\omega 2 w_к \Phi_2}{\sqrt{2} Z_к}. \qquad (a)$$

$$\Phi_2 = \sqrt{2} I_к 2w_к G \cos\theta. \qquad (b)$$

Подставляя (b) в (a), решая относительно $Z_к$ и сравнивая с уравнением $Z_к = \sqrt{r_к^2 + x_к^2}$, имеем

$$2\omega G \cdot \cos\theta w_к^2 = \sqrt{(2{,}5k_r w_к^2)^2 + \left(\frac{1}{\omega C} + 4\omega w_к^2 G_{ус}\right)^2}. \qquad (c)$$

Из (c) определяем $w_к$. Число витков $w_к$ бывает в пределах 1400—2000.

VI. Числа витков $w_р$, w_T. Учитывая условия $I_{ро} = 2{,}5$ a при $I_T = 0$, имеем

$$w_р = \sqrt{\frac{M_{ро}}{k_a I_{ро}^2}}.$$

Из условия

$$I_р w_р = I_T w_T$$

имеем

$$w_T = 1{,}3 w_р.$$

19-2. РЕЛЕ МОЩНОСТИ

В устройствах релейной защиты реле мощности применяют в качестве элементов, фиксирующих направление мощности. Поэтому в данном случае интересуются не точным замером значения мощности в линии, а только направлением энергии.

Необходимо обеспечить надежное срабатывание реле в случае короткого замыкания, когда напряжение сети резко снижается. Стремятся подобрать параметры реле такими, чтобы при коротком замыкании, когда угол φ сети изменяется, значение угла ψ было близко к 90°. Как правило, реле мощности включаются на линейные напряжения, например U_{ab}, U_{cb}, и линейные токи — I_a, I_b. Однако заводская характеристика реле относится к случаю включения катушек реле на напряжение и ток одной фазы, например U_a, I_a. Такую характеристику назовем основной.

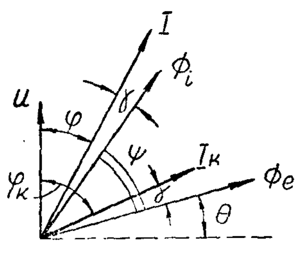
Вывод основной характеристики можно получить из векторной диаграммы реле (фиг. 19, 3):

$$\Phi_1 = k_1 U; \ \Phi_2 = k_2 I; \ \sin\psi = \sin[90 - (\varphi + \gamma + \theta)] = \cos(\varphi + \alpha);$$
$$M_м = k_м U I \cos(\varphi + \alpha).$$

Угол α называется дополнительным углом реле и выбирается в зависимости от схемы включения реле. Из той же диаграммы

видно, что угол α зависит от угла катушки $\varphi_к$. Таким образом, для изменения α необходимо менять значение $\varphi_к$ введением в цепь катушки емкостей или электрических сопротивлений.

Выбор угла α производится при построении векторной диаграммы действительного включения реле. Так, если включение производится по 90-градусной схеме (U_{bc}, I_a), то зная значение угла φ сети при коротком замыкании, можно найти α из условия получения в этом случае значения угла $\psi = 90°$.



Фиг. 19, 3. Векторная диаграмма.

Из этого условия (фиг. 19, 4) следует:

$$\varphi_к = 90 - \gamma - \delta; \qquad (a)$$

$$\delta = 90 - \gamma - \varphi. \qquad (b)$$

Из (*a*) и (*b*) получаем $\varphi_к = \varphi$. Тогда

$$\alpha = 90 - \varphi_к = 90 - \varphi = 90 - 75 = 15°.$$

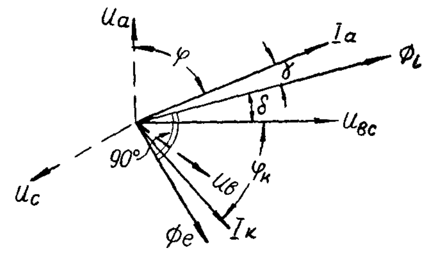
Для данного случая, т. е. включения реле по 90-градусной схеме и угла короткого замыкания сети $\varphi = 75°$, нужно применять реле мощности с основной характеристикой

$$M_М = k_м U I \cos(\varphi + 15).$$

Исполнения реле направления мощности

Существуют реле с тангенциальной системой и с барабанной системой. Первые применяются в тех случаях, когда не предъявляют особых требований к быстрому действию реле.

Ниже приводится примерный краткий расчет направления мощности. Схему и векторную диаграмму см. на фигуре 19, 5. Задано: $U = 100$ *в*, $I = 5$ *а*, $f = 50$ *гц*; $\varphi = 60°$, включение по 90-градусной схеме; начальный момент возвратной пружины $M_{по} = 0{,}5$ *Гсм*. Требуется определить данные катушек и минимальную мощность срабатывания.



Фиг. 19, 4. Векторная диаграмма.

1. Магнитная система. Принимаем для проектировани тангенциальную систему, представленную на фигуре 14, 1, пара метры согласно таблице 26.

2. Вычисление угла $\varphi_к$. Строится векторная диаграмм реле, напряжение линейное U_{bc}, ток фазы I_a. Значение $\varphi_к$ по бирается таким, чтобы при коротком замыкании ($\varphi = 60°$) знач ние $\psi = 90°$.

Из диаграммы $\varphi_к = 60°$. Нормально $\varphi_к$ реле равен 75°, для уменьшения его значения вводится дополнительно добавочное сопротивление $r_д$.

3. Определение $w_в$; задаются значением потребляемой мощности катушки, обычно в пределах 20 *ва* — 30 *ва*.

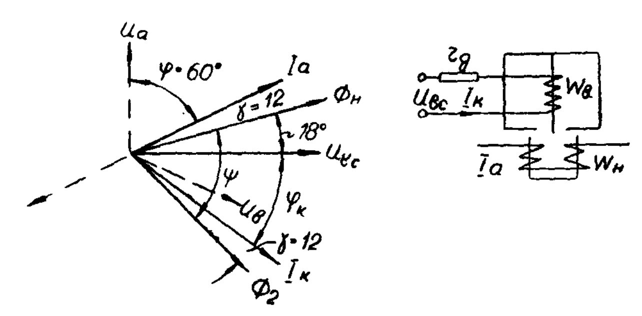
Примем $P_в = 30$ *ва*. Расчет проводится вначале без учета $r_д$. Тогда

$$Z = \frac{U^2}{P_в} = \frac{100^2}{30} = 334 \text{ ом}.$$

Из соотношения

$$k_z w_в^2 = Z; \quad w_в = \sqrt{\frac{334}{168 \cdot 10^{-6}}} = 1410$$

принимаем $w_в = 1400$.



Фиг. 19, 5. Схема включения и векторная диаграмма реле.

4. Определение $w_н$. Значение термической устойчивости принимается равным 50. По данным, приведенным в главе 2, допускается плотность тока $j = 155 \frac{a}{мм^2}$; тогда

$$q = \frac{250}{155} = 1{,}61 \text{ мм}^2; \quad d = 1{,}43 \text{ мм}.$$

Принимаем $d = 1{,}45$ *мм*. По габаритам нижнего магнитопровода в нем можно поместить две катушки по 17 витков: $w_н = 34$.

5. Вычисление $r_д$.

$$\frac{x}{r_в + r_д} = \operatorname{tg}\varphi_к = \operatorname{tg} 60° = 1{,}63; \quad x = 162 \cdot 10^{-6} w_в^2 = 316 \text{ ом};$$

$$r_в = 43{,}6 \cdot 10^{-6} w_в^2 = 87 \text{ ом}; \quad r_д = 107 \text{ ом}.$$

6. Полное сопротивление.

$$Z = \sqrt{x^2 + r^2} = 370 \text{ ом}.$$

7. Проверка $w_в$ по тепловому режиму. F при $U = 100$ *в*:

$$F = \frac{U}{Z} w_в = \frac{100}{370} \cdot 1400 = 380,$$

допустимое значение $F = 610$.

8. Значение $k_м$.

$$\sin\psi = 1;\ k_p = 7 \cdot 10^{-6};\ \gamma = 12°;\ G_в = 15;\ G_н = 8.$$

Тогда $k_м = 0{,}2$.

$$M_м = k_м UI = 0{,}2UI\ Гсм.$$

9. Минимальная мощность срабатывания реле $P_{мин}$.

Учитывая $M_{по} = 0{,}5\ Гсм$,

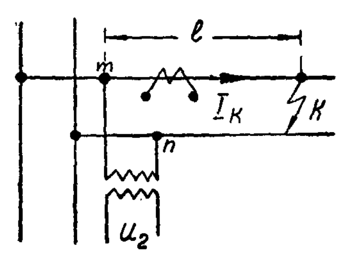
$$P_{мин} = \frac{0{,}5}{0{,}2} = 2{,}5\ ва.$$

19-3. РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Реле сопротивления применяются для выполнения дистанционных защит, действие которых определяется дистанцией — расстоянием от места установки защиты до места повреждения. Линия электропередачи характеризуется сопротивлением одного километра линии $Z\ км$.

При коротком замыкании на участке линии (K) (фиг. 19, 6) на зажимах mn получается напряжение

$$U_{mn} = 2lI_к Z_{км}.$$



Фиг. 19, 6. Схема участка линии электропередачи.

Полное сопротивление петли $mкn$

$$Z_1 = \frac{U_{mn}}{I_к} = 2lZ_{км}.$$

При расчете реле принимают во внимание вторичные значения сопротивлений, т. е. величины сопротивлений с учетом напряжений и токов во вторичных цепях трансформаторов тока и напряжения:

$$U_2 = \frac{U_{mn}}{k_1};\quad I_2 = \frac{I_к}{k_2};\quad z_2 = Z_1\frac{k_2}{k_1}.$$

Ниже рассматриваются только вторичные значения напряжений, токов и сопротивлений.

В практике, как правило, применяются реле сопротивления минимального действия, т. е. срабатывающие в том случае, если сопротивление петли короткого замыкания $mкn$ меньше установленного в реле.

При построении реле сопротивления учитываются два режима работы линии электропередачи: 1) нормальный, характеризующийся номинальными значениями электрических величин; 2) аварийный.

Для нормального режима принимают

$$U = 100\ в;\ I = 5\ а;\ z = \frac{100}{5} = 20\ ом.$$

В аварийном режиме линии резко снижается ее сопротивление, напряжение на зажимах *mn* резко падает, а ток короткого замыкания увеличивается.

Одно и то же значение z может иметь место при различных вторичных значениях напряжений и токов.

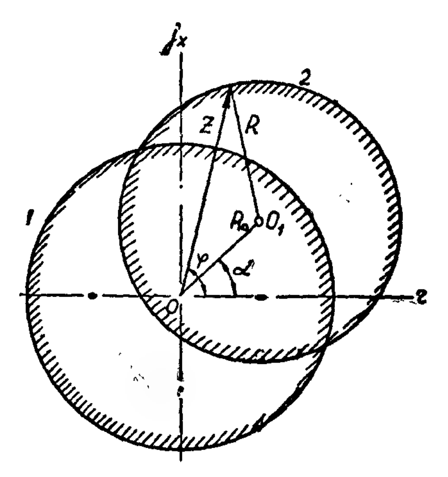
Например, $z = \frac{50}{20} = \frac{20}{8} = 2{,}5$ *ома*.

Отсюда возникает требование к реле: его срабатывание должно определяться не величинами U и I, а их отношением.

Отметим, что в длинных, сильно загруженных линиях электропередачи значения z при нормальном и аварийном состояниях линии мало отличаются; в данном случае для срабатывания реле пользуются тем, что углы полного сопротивления при этих режимах резко отличны.

Характеристики реле сопротивления строят обычно в координатах r — омического сопротивления и x — индуктивного линии.

Эти характеристики имеют вид окружностей (фиг. 19, 7) с различным расположением центров: 1) реле полного сопротивления с центром в начале координат; штриховкой показана граница срабатывания реле — оно срабатывает при значениях Z меньших радиуса окружности; 2) направленное реле сопротивления с центром вне начала координат.



Фиг. 19, 7. Характеристика реле сопротивления.

Принципы построения реле

Общее уравнение окружности в полярных координатах r — x (фиг. 19, 7).

$$z^2 + R_0^2 - 2zR_0 \cos(\varphi - \alpha) = R^2. \qquad (19\text{-}1)$$

Здесь R_0 — полярный радиус-вектор центра окружности, α — угол между R_0 и осью абсцисс.

Частные случаи:

1) $R = R_0$ — окружность проходит через начало координат;

2) $R_0 = 0$ — центр окружности в начале координат.

Уравнение реле сопротивления должно соответствовать (19-1).

Для решения задачи выполняют реле так, чтобы на общую ось действовали моменты трех магнитных систем с характеристиками

$$M_м = k_м UI \cos(\varphi - \alpha); \quad M_т = k_т I^2; \quad M_н = k_н U^2.$$

Знаки моментов должны быть такими, чтобы моменту $M_н$ противодействовали M_T и $M_м$.

В нормальном режиме

$$U = U_н;\quad M_н > M_м + M_T;$$

в аварийном

$$U \ll U_н;\quad M_н < M_м + M_T.$$

Расчет реле проводится по критическому положению

$$M_н = M_м + M_T;$$

$$k_н U^2 - k_м U I \cos(\varphi - \alpha) = k_T I^2.$$

Разделив все члены уравнения на $k_н I^2$, считая $\frac{U}{I} = Z$, и добавив в каждой части $\left|\frac{k_м}{2k_н}\right|^2$, получаем

$$z^2 + \left|\frac{k_м}{2k_н}\right|^2 - \frac{k_м}{k_н} z \cos(\varphi - \alpha) = \left|\sqrt{\frac{k_м^2 + 4k_T k_н}{4k_н^2}}\right|^2. \qquad (19\text{-}2)$$

Полученное выражение соответствует уравнению окружности в полярных координатах. Радиус окружности

$$R = \sqrt{\frac{k_м^2 + 4k_T k_н}{4k_н^2}}.$$

Положение центра характеризуется полярным радиусом-вектором

$$R_0 = \frac{k_м}{2k_н}.$$

Выражение (19-2) является исходным для построения разных видов дистанционных реле. При наличии всех трех элементов — тока, напряжения и мощности, получается характеристика, соответствующая окружности *2* (фиг. 19, 7).

В частном случае, при отсутствии элемента мощности, т. е. когда $k_м = 0$, получают реле полного сопротивления (окружность *1*).

$$R = \sqrt{\frac{k_T}{k_н}} = z;\quad R_0 = \frac{k_м}{2k_н} = 0.$$

Ранее выполнялись многосистемные реле, т. е. такие, в которых на общую ось действовали механически моменты трёх систем. Более рациональной является конструкция односистемного реле, в котором сравнение моментов $M_н$, $M_м$ и M_T осуществляется соответствующим распределением магнитных полей в индукционной системе.

Советские инженеры и ученые провели ряд работ по усовершенствованию реле сопротивления и схемы дистанционных защит.

А. С. Тулин и Г. Ф. Эдельштейн разработали односистемное дисковое реле. А. М. Бресслер разработал ряд исполнений одиосистемных реле сопротивления на основе четырехполюсной барабанной индукционной системы.

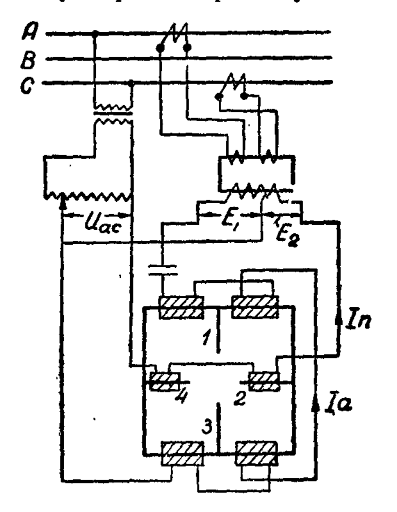
Детальная разработка различных видов реле сопротивления должна проводиться с учетом особенностей принятых схем защиты. Вопросы компановки таких схем изложены в специальной литературе.

Пример исполнения направленного реле сопротивления

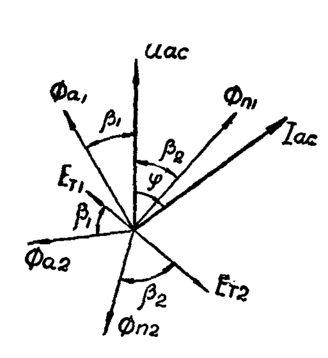
Реле состоит из индукционной системы и промежуточных трансформаторов тока и напряжения.

а) Трансформатор тока выполняется с воздушным зазором; в таких трансформаторах угол потерь получается незначительным и поэтому в расчетах угол между током I и э. д. с. E во вторичной обмотке принимают равным 90°.

Вторичная обмотка снабжается отпайками для регулирования параметров реле. Промежуточный трансформатор имеет две пер-



Фиг. 19, 8. Схема включения реле сопротивления.



Фиг. 19, 9. Векторная диаграмма реле сопротивления.

вичные катушки, включенные в цепь трансформаторов тока разных фаз с тем, чтобы намагничивающая сила в магнитной системе была пропорциональна разности линейных токов, например, $F = c\,(I_a - I_c)$.

б) Трансформатор напряжения исполняется иногда в виде автотрансформатора, снабжается отпайками для регулирования параметров реле. Примерная схема включения реле приведена на фигуре 19,8.

Индукционная система имеет две группы катушек:

1) Четыре катушки ярма; ток в цепи этих катушек определяется напряжением U и э. д. с. E_1; емкость c подбирается так, чтобы поток в системе опережал по фазе приложенные напряжения.

2) Две катушки, расположенные на полюсах *2* и *4*, включаются на напряжение U и э. д. с. E_2.

Для пояснения работы реле рассмотрим отдельно токи в контурах и потоки в системе, определяемые напряжением U и э. д. с. E (см. векторную диаграмму фиг. 19,9).

Потоки полюсов *1*, *3*: $\Phi_{a1} = c_1 U$; $\Phi_{a2} = c_2 I$.

Потоки полюсов *2*, *4*: $\Phi_{n1} = c_3 U$; $\Phi_{n2} = c_4 I$.

Результирующий момент на роторе имеет следующие составляющие:

$$M_м = k_p [\Phi_{a1}\Phi_{n2} \sin\psi_1 + \Phi_{a2}\Phi_{n1} \sin\psi_2] = k_м UI \cos(\varphi - \alpha);$$

$$M_н = k_p \Phi_{a1}\Phi_{n1} \sin\psi_3 = k_н U^2;$$

$$M_T = k_p \Phi_{a2}\Phi_{n2} \sin\psi_4 = k_T I^2.$$

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

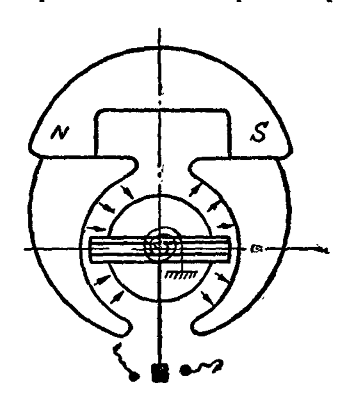
РАЗНЫЕ РЕЛЕ, КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ГЛАВА 20

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

20-1. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

В магнитоэлектрических реле вращение подвижной части, рамки, определяется взаимодействием поля постоянного магнита с током рамки. Такие реле применяются только для цепей постоянного тока. Включение их в цепь переменного тока возможно через выпрямители.



Фиг. 20, 1. Система магнитоэлектрического реле.

Фиг. 20, 2. Система магнитоэлектрического реле.

Особенностью магнитоэлектрических реле является их высокая чувствительность. Имеются исполнения таких реле с мощностью срабатывания $P = i^2r$ порядка $1 \cdot 10^{-10} \div 1 \cdot 10^{-11}$ ватт. Время срабатывания их относительно велико — порядка $0{,}4 \div 1$ секунды, давление в контактах незначительное, порядка 0,5 *Г*. Поэтому область применения магнитоэлектрических реле весьма ограничена, они применяются в схемах, где требуется элемент весьма высокой чувствительности.

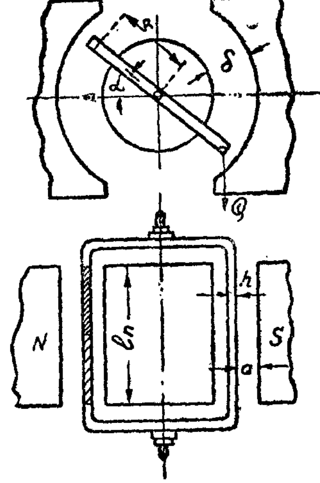
Формы магнитных систем. Различают две основные формы: с внешним магнитом и с внутрирамочным магнитом. Вторая форма применяется в тех случаях, когда требуется выполнение конструкции весьма малых габаритов. Такие условия предъявляются к конструкциям ряда типов реле.

На фигуре 20,1 приведена форма системы реле обычного исполнения, заимствованная из измерительной техники.

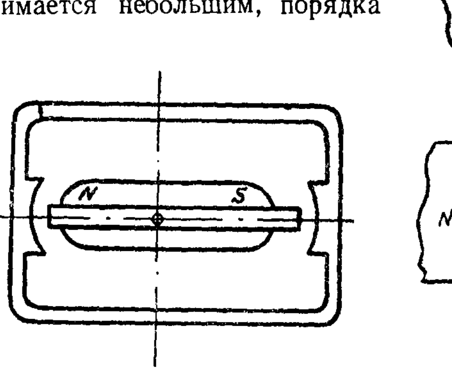
На фиг. 20,2 показано исполнение системы, дающее лучшее решение в отношении компактности устройства.

На фиг. 20,3 приведено исполнение реле с внутрирамочным магнитом.

Представляет интерес применяемая в настоящее время в измерительной технике конструкция системы с подвижным магнитом весьма малого веса (порядка 1 *Г*). Катушка системы неподвижна и может иметь увеличенные габариты. Добавочный постоянный магнит, расположенный под катушкой, заменяет спиральные моментные пружинки.



Основные соотношения для расчета. Рабочий угол рамки α принимается небольшим, порядка



Фиг. 20, 3. Система с внутрирамочным магнитом.

Фиг. 20, 4. Подвижная система реле.

5—10° от нейтрального положения. Полюсы магнита выполняются так, чтобы поле магнита было равномерным в пределах рабочих углов поворота рамки. Сила на рамке

$$Q = 1{,}02 \cdot 10^4 B i l_n w \ \ \Gamma, \qquad (20\text{-}1)$$

где B — $\frac{вб}{см^2}$ — индукция в рабочем зазоре;

i — ток в рамке, w — число витков рамки,

l_n — рабочая длина проволоки рамки в *см* (фиг. 20, 4).

Момент

$$M = 2 \cdot 1{,}02 \cdot 10^4 B i l_n w R, \qquad (20\text{-}2)$$

или

$$M = ki, \qquad (20\text{-}3)$$

т. е. момент пропорционален току в рамке.

При питании катушки выпрямленным током расчет проводится по среднему значению тока. Система реле снабжается обычно двумя спиральными моментными пружинами, действующими друг против друга и устанавливающими рамку в нейтральное положение.

$$M = 2j\alpha,$$

где j — жесткость пружин в $\frac{Г\,см}{рад}$; α — рабочий угол поворота рамки в радианах.

Рабочие моменты в магнитоэлектрических реле относительно невелики. Поэтому при вычислении значения тока срабатывания реле учитывается момент трения $M_{тр}$ (см. главу 24).

Ток срабатывания

$$i = \frac{2j\alpha + M_{тр}}{\kappa}. \qquad (20\text{-}4)$$

Время срабатывания реле

Полное время, t, срабатывания реле определяется в основном временем движения рамки $t_д$. Временем $t_н$ пренебрегают, учитывая малое значение постоянной времени рамки. При составлении дифференциального уравнения движения необходимо учитывать дополнительные демпфирующие моменты, возникающие на рамке в процессе ее движения.

1) При движении рамки в ее обмотке индуктируется э. д. с.

$$e_д = -\frac{d\Phi_p}{dt} w; \quad i_д = \frac{e_д}{r},$$

где Φ_p — поток, пронизывающий рамку, r — электрическое сопротивление рамки. Согласно фигуре 20,4

$$\Phi_p = 2BRl_p \sin\alpha \text{ вебер.}$$

Здесь R и l_p в сантиметрах.

Учитывая, что при малых углах $\sin\alpha \approx \alpha$, получаем величину демпфирующего тока рамки:

$$i_д = -\frac{2\,BRl_p w\,\alpha'}{r} = \kappa_1\alpha'. \qquad (20\text{-}5)$$

Демпфирующий момент, согласно выражению (20-3):

$$M_д = kk_1\alpha'. \qquad (20\text{-}6)$$

2) В алюминиевом каркасе рамки индуктируются э. д. с.: первая, определяемая изменением тока в обмотке рамки

$$e_{к1} = -M\frac{di}{dt};$$

вторая, определяемая движением каркаса в магнитном поле

$$e_{к2} = -\frac{d\Phi_p}{dt}.$$

Значение $e_{к1}$ относительно невелико и им пренебрегают. Демпфирующий момент каркаса определяется в основном э. д. с. $e_{к2}$.

$$i_к = \frac{e_{к2}}{r_к} = \frac{-2\,BRl_p\,\alpha'}{r_к} = k_2\alpha', \qquad (20\text{-}7)$$

$$M_{дк} = \frac{k}{w}k_2\alpha'. \qquad (20\text{-}8)$$

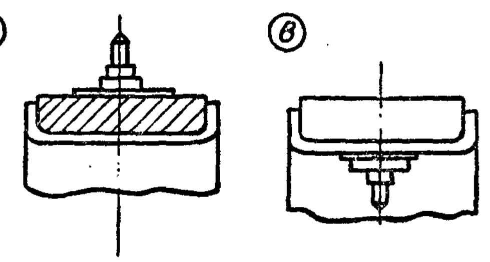
Дифференциальное уравнение движения рамки

$$J\alpha'' + \left(kk_1 + \frac{k}{w} k_2\right)\alpha' + 2j\alpha = ki - M_{тр}. \qquad (20\text{-}9)$$

Конструктивные вопросы

1) *Постоянный магнит* выполняется из высококоэрцитивного сплава — магнико, альнико. Индукция B в рабочем зазоре принимается порядка $(0,2 — 0,3) \cdot 10^{-4} \frac{вб}{см^2}$.

2) *Рамки.* Применяется медная проволока с эмалевой изоляцией, диаметр провода — 0,02 — 0,03 *мм*. Каркас рамки — алюминий толщиной 0,2 — 0,3 *мм*.



Фиг. 20, 5. Крепление керна: *a* — снаружи рамки; *b* — внутри рамки.

При выборе толщины намотки h (фиг. 20, 4) необходимо учитывать следующее: при увеличении h можно повысить число витков рамки. При этом, однако, увеличивается вес рамки, а следовательно, момент трения, увеличивается зазор δ, что в свою очередь приводит к уменьшению индукции B.

Необходимо проводить несколько вариантов расчета с целью получения оптимального решения. Вес рамки обычно бывает порядка 1 *Г*, размер a принимается из конструктивных соображений так, чтобы не имело место затирание рамки.

3) *Опоры* выполняются в виде кернов. Последние крепятся в буксе, которая приклеивается к рамке. Обычно керны крепятся снаружи рамки (фиг. 20, 5*a*), но в некоторых случаях для уменьшения размеров конструкции применяют крепление керна внутри рамки (фиг. 20, 5*b*).

4) *Контакты* реле выполняются из платины или платины-ирридия.

20-2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

В электродинамических реле момент на подвижной рамке определяется взаимодействием поля неподвижного электромагнита с током в рамке.

Электродинамические системы применялись ранее для построения реле направления мощности, дистанционных и других. Однако ввиду недостаточной надежности подвижной рамки и относительно большого времени срабатывания эти реле исполняются сейчас с использованием других принципов действия.

В настоящее время электродинамические системы имеют весьма ограниченное применение: известны только исполнения систем для построения автоматических регуляторов постоянного тока.

Форма магнитных систем

В устарелых конструкциях электродинамических реле применялась форма, заимствованная из измерительной техники — с вращающейся рамкой. Более совершенными являются конструкции с поступательным движением рамки (фиг. 20, 6). На фигуре 20, 7 приведено исполнение системы для автоматических регуляторов мощности.

Рамка перемещается в поле Φ катушки, расположенной на неподвижном сердечнике. В зазоре между кольцом неподвижного магнитопровода и сердечником имеет место равномерное поле с индукцией B, причем

$$B = cU. \qquad (20\text{-}10)$$

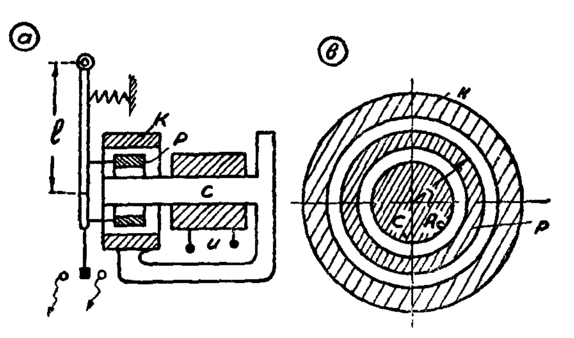
Фиг. 20, 6. Электродинамическая система.

Рабочий момент на рамке

$$M = 1{,}02 \cdot 10^{4} Bi \, 2\pi R_c wl \; Гсм \qquad (20\text{-}11)$$

При равенстве этого момента моменту пружины M_n рычаг с рамкой устанавливается в среднем положении между контактами. Заменяя в (20-11) значение B, из (20-10) получаем

$$M = kUi. \qquad (20\text{-}12)$$



Фиг. 20, 7. Система регулятора мощности:
a — эскиз; *b* — разрез по кольцу.

Таким образом, момент на рамке пропорционален мощности регулируемой системы.

ГЛАВА 21

ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

21-1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Термическими называются реле, срабатывающие при определенной температуре нагрева измерительного элемента реле. Нагрев этого элемента может быть осуществлен двояко: 1) теплом, развиваемым протекающим током (в самом элементе или в окружающем его нагревательном устройстве), 2) теплом окружающей среды. Различают поэтому две группы термических реле.

1) **Тепловые**, работающие в функции тока: токовые реле для защиты при перегрузках и токах короткого замыкания, пусковые реле в функции тока, реле времени.

Различают непосредственно тепловые реле и терморасцепители. Тепловые реле снабжаются контактами небольшой разрывной мощности. Терморасцепители являются частью воздушных автоматических выключателей (установочных автоматов); во включенном положении эти выключатели удерживаются рычажной системой, запертой терморасцепителем; при соответствующей деформации биметалла рычажная система освобождается от зацепления и выключатель отключается.

2) **Термореле или термостаты**, работающие в функции температуры окружающей среды. Термореле исполняются как реле максимального действия, срабатывающие при определенной максимальной температуре, или как регуляторы, контролирующие температуру определенного устройства — электрической печи, обмотки электродвигателя, и других. Каждый термостат снабжается регулировочным устройством для настройки на определенную температуру срабатывания.

В качестве основного чувствительного к температуре элемента применяют: 1) легкоплавкие сплавы; 2) тела с изменяющейся магнитной проницаемостью; 3) испаряющиеся или расширяющиеся жидкости; 4) тела с изменяющимся электрическим сопротивлением; 5) твердые тела с различными коэффициентами линейного расширения; 6) термобиметаллы. Наибольшее распространение получили термореле с применением элементов в виде твердых тел с различными коэффициентами линейного расширения и с применением биметаллов. Ниже рассматриваются вопросы проектирования и расчета таких реле.

21-2. ТЕРМОБИМЕТАЛЛ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

Биметаллами называют ленты или полосы, состоящие из отдельных сваренных или спаянных вместе полос металлов. В машиностроении применяют два вида биметалла:

1) антикоррозийный, состоящий из стальных полос с наложенными по обе стороны полосами из антикоррозийного металла меди, латуни и других;

2) *термобиметалл*, состоящий из двух металлов-компонентов с разными коэффициентами линейного расширения.

В термореле применяется только термобиметалл, который в дальнейшем для сокращения называем биметаллом. Подробные данные о составе компонентов и технологии изготовления биметалла изложены в литературе. Ниже приводятся только основные, необходимые для расчета данные.

Марки биметалла. Наша промышленность изготовляет биметаллические полосы и ленты разных сортов, марок, отличающихся металлом или сплавом активного и пассивного компонента. Некоторые технические данные разных марок приведены в ГОСТ 5198—50 (см. табл.28) и в технических условиях ЦМТУ (см. табл. 29). Указанные в ГОСТ данные о коэффициенте чувствительности M учитывают разность коэффициентов линейного расширения компонентов $M = \alpha_1 - \alpha_2$.

Таблица 28

Данные термобиметалла (из ГОСТ 5198—50)

Марка	Коэффициент чувствительности M не менее $°C^{-1} \cdot 10^6$	Удельное сопротивление ρ, $ом \frac{мм^2}{м}$	Температурный интервал постоянства коэффициента чувствительности, °C	Температура нагрева биметалла соответствен. верхнему пределу упругих деформаций, °C	
				при нагреве без нагрузки	при нагреве с нагрузкой
ТБ1	21	0,58—0,68	—60+(190÷210)	530÷550	280÷310
ТБ2	18	0,56—0,64	—50+(320÷340)	430÷450	240÷260
ТБ3	20	0,75—0,83	—50+(190÷210)	450÷470	210÷230
ТБ4	12	0,14—0,20	—60+(190÷210)	410÷430	280÷300
ТБ5	19	0,08—0,14	—50+(180÷210)	180÷200	140÷160
ТБ6	19,5	0,14—0,20	—50+(190÷210)	230÷250	120÷140
ТБ7	18	0,14—0,18	—50+(210÷230)	290÷310	160÷170

Таблица 29

Размеры термобиметаллических полос и лент
(по техническим условиям ЦМТУ 1900—44)

	Размеры в *мм*					
	Толщина	Допуск отклонений по толщине	Ширина	Допуск отклонений по ширине	Длина	Допуск отклонений по длине
Полосы	0,6—1,0 1,0—1,5	±0,04 ±0,05	10÷120	±0,5	300—1000	±10
Ленты	0,2—0,5	0,03	10÷120	±0,5	500—2000	±10

Выбор соответствующей марки определяется предельным значением рабочей температуры, требуемой чувствительностью, влияющей на величину деформации, электрическим сопротивлением и устойчивостью против коррозии.

Параметры. Помимо указанных в таблице 28, необходимо иметь данные о некоторых других параметрах.

1) *Модуль* упругости E колеблется в пределах $(12{,}5 \div 16) \times 10^6 \frac{Г}{мм^2}$. В среднем, для наиболее ходких биметаллов принимают $E = 15 \cdot 10^6 \frac{Г}{мм^2}$.

2) *Температурный* коэффициент по сопротивлению: от 0,03 до 0,7% на 1°.

3) *Внутренние напряжения.* Реле должно быть исполнено так, чтобы внутренние напряжения, возникающие в биметалле, не превосходили пределов упругости компонентов; при этом должен быть введен коэффициент безопасности. Значение Q — равномерной аксиальной силы в каждом компоненте: сжатия в первом, растяжения во втором, определяется по упрощенной формуле

$$Q = \frac{E(\alpha_1 - \alpha_2)}{h}\vartheta, \qquad (21\text{-}1)$$

где h — толщина биметалла, в *мм*.

4) *Термическая устойчивость.* В тепловых реле с непосредственным нагревом биметалла могут возникнуть при коротком замыкании в защищаемой линии значительные температуры, приводящие к расплавлению биметалла или частичному его выгоранию в местах наибольшей плотности тока. Количество выделяемого в биметалле тепла зависит от величины тока к. з. $i_к$, длительности $t_к$ и сопротивления r биметалла.

Среднее значение $(i_к)_{ср}$ определяется из формулы

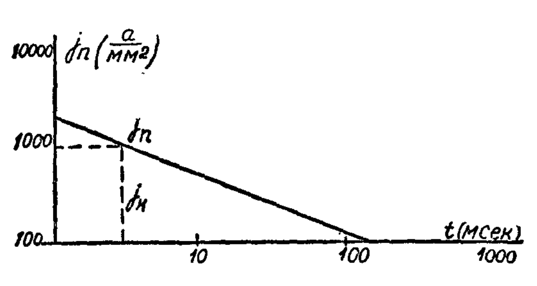
$$(i_к)_{ср} = \sqrt{\frac{1}{t_к}\int_0^t i_к^2\,dt}. \qquad (21\text{-}2)$$

Для расчетов пользуются данными допустимой плотности тока для каждой марки биметалла

$$j_к = \frac{(i_к)_{ср}}{b_1 h} \quad \frac{a}{мм^2} \qquad (21\text{-}3)$$

При этом $j_к$ должно быть меньше j_n плотности тока, при которой начинается плавление металла:

$$\frac{j_n}{j_к} = 1{,}5 \div 2.$$



Фиг. 21, 1. Зависимость $j_n = f(t)$.

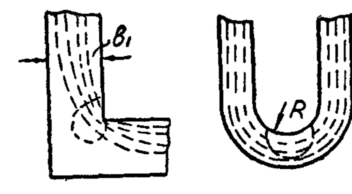
На фигуре 21,1 приведена примерная зависимость $j_n = f(t_к)$, которую следует строить для разных марок.

Необходимо учитывать местные увеличения плотности тока, определяемые неравномерным распределением линий тока в изогну

той пластинке (фиг. 21, 2). Уменьшение величины местных перегревов достигается увеличением радиуса R. Ниже приводятся опытные данные, показывающие влияние значения R на кратность n увеличения температуры в месте перехода

R	1,1	2	5
n	2	1,5	1,2

Таким образом, при нагреве пластинки током короткого замыкания до $\vartheta_к$, например до 800°, температура в месте перехода получается при $R = 2$ *мм*, $\vartheta_{к1} = 1200°$.

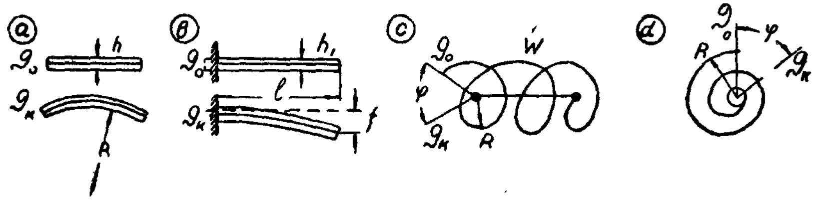


Фиг. 21, 2. Распределение линий токов в изогнутом проводнике.

21-3. ДЕФОРМАЦИИ БИМЕТАЛЛА

Вывод основных уравнений для определения деформации термобиметалла дан профессором Тимошенко. Ниже приводятся основные соотношения для расчета.

Свободная пластинка. При нагреве прямой пластинки (с температурой ϑ_0) до температуры $\vartheta_к$ пластинка изгибается (фиг. 21, 3*a*).



Фиг. 21, 3. Исполнения биметаллических элементов.

Если учитывать определенное приведенное значение модуля упругости E, то кривизна пластинки

$$c = \frac{1}{R} = \frac{6M \cdot h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^3}\vartheta; \tag{21-4}$$

$$\vartheta = \vartheta_к - \vartheta_0, \tag{21-5}$$

где M — коэффициент чувствительности биметалла; h_1 и h_2 — толщина компонентов. Обычно выполняют биметалл: $h_1 = h_2 = 0{,}5h$; тогда

$$c = \frac{1}{R} = 1{,}5M\frac{\vartheta}{h}. \tag{21-6}$$

Пластинка изгибается не только по длине, но и по ширине. При $l \gg b$ изгиб по ширине не учитывают.

Свободная шайба. При нагреве деформируется вся шайба с кривизной c (см. выражение 21-6).

Плоская пластинка закреплена в одном конце. Деформация конца пластинки (фиг. 21, 3*b*).

$$f = 0{,}75\,M\frac{l^2}{h}\vartheta \tag{21-7}$$

Геликоидальная пружина (винтовая цилиндрическая, фиг. 21, 3 *c*)

$$\varphi = 1{,}5\,M \frac{2\pi\,Rw}{h}\,\vartheta \text{ радиан,} \qquad (21\text{-}8)$$

где w — число витков пружины.

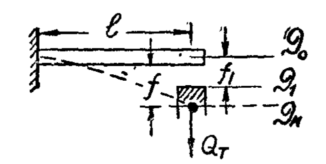
Спираль (фиг. 21, 3 *d*)

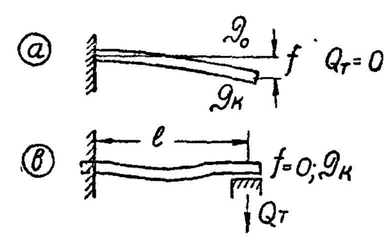
$$\varphi = 1{,}5 \cdot M \frac{l}{h}\,\vartheta \text{ радиан,} \qquad (21\text{-}9)$$

где l — длина спирали.

21-4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛЫ, РАЗВИВАЕМЫЕ БИМЕТАЛЛОМ

Свободный конец биметаллической пружины — плоской или спиральной, деформируется при нагреве вследствие возникающих в пружине внутренних напряжений. Величина деформации изменяется в том случае, если конец пружины не может перемещаться свободно, а должен преодолевать действие внешних механических





Фиг. 21, 4. Деформации биметаллической пластинки:
a — свободной; *b* — подпертой.

Фиг. 21, 5. К определению сил на пластинке:
a — изображение в плане сплошной пластинки; *b* — с вырезом.

сил. Для определения сил, развиваемых биметаллом, система рассматривается так, как в случае приложения сил, изгибающих пружину на величину деформации (f, φ), соответствующей температуре $\vartheta = \vartheta_к - \vartheta_0$. Рассмотрим отдельные виды пружин.

Плоская пружина, закрепленная в одном конце (фиг. 21,4). Свободная деформация

$$f = 0{,}75 \cdot M \frac{l^2}{h}\,\vartheta \qquad (21\text{-}7)$$

сила в конце $Q_T = 0$.

Если пружина подперта, то она давит на опору силой Q_T. С некоторым приближением значение Q_T определяют из условия изгиба консольной балки на величину f:

$$Q_T = \frac{3EJ}{l^3} f. \qquad (21\text{-}10)$$

Из (21-7) и (21-10)

$$Q_T = 2{,}25 \frac{EJM}{lh}\,\vartheta.$$

В случае сплошной пластинки $J = \frac{bh^3}{12}$ (фиг. 21,5 *a*),

тогда

$$Q_T = \frac{3}{16} ME \frac{bh^2}{l} \vartheta. \qquad (21\text{-}11)$$

В случае U-образной пластинки $J = \frac{b_1 h^3}{6}$ (12-12)

$$Q_T = \frac{3}{8} ME \frac{b_1 h^2}{l} \vartheta. \qquad (21\text{-}13)$$

Введем понятие — жесткость пластинки по температуре:

$$j_T = \frac{Q_T}{\vartheta}. \qquad (21\text{-}14)$$

Для сплошной пластинки

$$j_T = \frac{3}{16} ME \frac{bh^2}{l} \quad \left(\frac{Г}{°C}\right). \qquad (21\text{-}15)$$

Для V-образной

$$j_T = \frac{3}{8} ME \frac{b_1 h^2}{l} \quad \left(\frac{Г}{°C}\right). \qquad (21\text{-}16)$$

Спираль. Уравнение механического момента, развиваемого спиральной пружиной при угле закручивания φ:

$$M_T = \frac{EJ}{l} \varphi = \frac{Ebh^3}{12 l} \varphi \quad Гмм. \qquad (21\text{-}17)$$

Деформация спирали при нагреве

$$\varphi = 1{,}5\, M \frac{l}{h} \vartheta. \qquad (21\text{-}18)$$

Из (21-17) и (21-18)

$$M_T = \frac{1}{8} bh^2 ME\vartheta. \qquad (21\text{-}19)$$

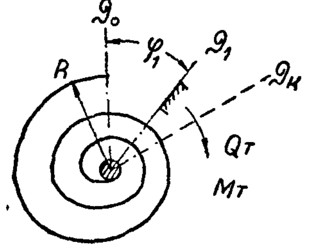
$$j_T = \frac{M_T}{\vartheta} = \frac{1}{8} bh^2 ME. \qquad (21\text{-}20)$$

Примеры. Полученными соотношениями пользуются в практически встречающихся случаях, когда биметаллическая пружина при своем перемещении должна преодолевать механические силы или создавать их в контактной системе.

1) Определить давление на контакте (фиг. 21,5). Биметалл нагревается до температуры $\vartheta_к$, соответственно этому свободная деформация дожна быть f. Контакт расположен на расстоянии f_1 от начального положения пружины при ϑ_0. Для деформации f_1 необходим нагрев ϑ_1:

$$\vartheta_1 - \vartheta_0 = f_1 \frac{h}{0{,}75 M l^2};$$

$$Q_T = j_T (\vartheta_к - \vartheta_1).$$



Фиг. 21, 6. Биметаллическая спираль.

2) Спиральная пружина (фиг. 21, 6). Начальные условия: ϑ_0; $\varphi_0 = 0$. Нагрев до температуры $\vartheta_к$, свободный ход — φ_1.

$$M_T = j_T (\vartheta_к - \vartheta_1); \quad \vartheta_1 = \varphi_1 \frac{h}{1{,}5 Ml}; \quad Q_T = \frac{M_{Tк}}{R}.$$

21-5. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЛЕ

Технические условия. Срабатывание теплового реле должно происходить при определенных значениях токов и времени срабатывания. При проектировании реле различают значения токов $I_н$ — номинальное, I — ток перегрузки.

Введем понятие о коэффициенте перегрузки, представляющем собой кратность тока перегрузки к номинальному.

$p_0 = \frac{I}{I_н}$ — минимальное значение кратности тока, при котором должно произойти срабатывание реле. Обычно принимают $p_0 = 1{,}2 \div 1{,}25$. При выборе меньших значений p_0 требуется тщательная подгонка всех частей реле и наличие температурной компенсации. Время $t_с$ при кратности p_0 обычно не лимитируется. Важным является установление времени $t_с$ при кратности $p > p_0$, причем выбор значения p определяется условиями работы реле. Так, для защиты электродвигателей малой и средней мощности, характеризующихся тяжелыми условиями пуска — значительная кратность пускового тока, продолжительный пусковой режим, требуется время $t_с = 1 \div 5$ секунд при $p = 8$.

Для защиты силовых цепей установок, характеризующихся незначительной кратностью пускового тока, кратковременным пусковым режимом, контрольной точкой характеристики принимают $p = 2{,}5$; $t_с = (3 \div 20)$ секунд.

При проектировании реле для подвижных установок необходимо учитывать условия вибро- и ударостойкости. При вибрации и тряске установок появляются колебания небольшой амплитуды определенной частоты, например амплитуды 1 *мм*, $f = 45$ *гц*. При наличии вибраций и ударов в установке могут иметь случаи непроизвольного срабатывания реле.

Конструктивные вопросы. В практике применяется три способа нагрева биметалла: прямой и косвенный, в редких исполнениях — комбинированный. Выбор способа нагрева определяется, в основном, условиями создания шкалы токов реле.

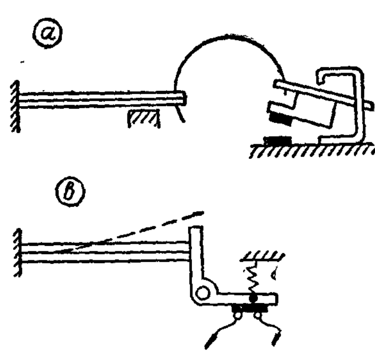
Необходимо всегда выполнять реле с большой градацией сил токов, чтобы номинальный ток реле мало отличался от номинального тока двигателя. Так, в реле ТРА в пределах токов 7 — 52 *а* применяется 15 исполнений.

При прямом нагреве применяются U-образные биметаллические пластины. Большое число исполнений по току срабатывания достигается изменением размеров биметалла по ширине b_1 или толщине h; в некоторых случаях применяют пакеты из нескольких пластин. При больших значениях номинального тока ($I_н > 50а$) шунтируют биметалл электрическим сопротивлением.

Способ прямого подогрева имеет следующие недостатки: 1) необходимо иметь в производстве большое число штампов для изготовления пластин разных размеров; 2) при замене в эксплуатации исполнения реле для какого-либо значения $I_н$ на другое не-

обходимо заменить биметаллический элемент, что связано с дополнительной настройкой.

При косвенном подогреве биметаллическая пластинка подогревается от отдельного нагревательного элемента, расположенного непосредственно над пластинкой. Одно и то же исполнение реле, с одним размером биметалла, пригодно для большого числа исполнений по току, меняется только нагревательный элемент. Так, реле исполнения на 25 *а* пригодно при установке соответствующих нагревательных элементов для сил токов от 0,5 до 25 *а*. При замене нагревательных элементов не требуется перерадуировка реле.



Фиг. 21, 7. Исполнения контактных систем.

Контактные системы. Исполнение конструкций с непосредственным воздействием биметаллической пластинки на контактную цепь нерационально, так как контактная цепь при нагреве или охлаждении биметалла замыкается или размыкается весьма медленно, что приводит к подгоранию контактов.

Моментное действие контактов достигается двумя способами:

1) конец биметаллической пластинки связан с прыгающей пружиной (фиг. 21, 7 *а*);

2) конец биметаллической пластинки защемляет контактный рычаг реле, освобождая последний при нагреве (фиг. 21,7 *b*);

В терморасцепителях для автоматических выключателей при нагреве биметаллической пластинки освобождается рычаг зацепления. Возврат контактной системы в исходное положение осуществляется от руки, что принимается из условий эксплуатации установки: не допускается автоматическое повторное включение реле или выключателя, так как размыкание цепи происходит в случаях аварийных режимов.

Температуры срабатывания биметалла тепловых реле. В биметаллической пластинке непосредственного нагрева температура распределяется неравномерно — наибольшая получается в средней части пластинки (фиг. 21, 8). Расчетные температуры: $\vartheta_н$ при $I_н$, ϑ_c при I принимают для точек, расположенных на расстоянии l_4 длины l_c от середины. Выбор значения ϑ_c связан с требуемой точностью работы реле при колебаниях температуры окружающей среды.

Установим связь между температурой биметалла и кратностью перегрузки. В установившемся режиме температура нагрева определяется электрическими потерями I^2r и теплоотдачей μS.

Обозначим: ϑ_0, $\vartheta_н$, ϑ_c — температуры окружающей среды, при номинальном токе $I_н$, при перегрузке $I = p_0 I_н$.

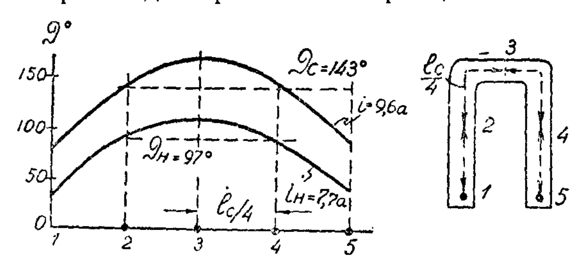
Тогда

$$\vartheta_c = \vartheta_0 + \frac{p_0^2 I_н^2 r}{\mu S} \quad (a); \quad \vartheta_н = \vartheta_0 + \frac{I_н^2 r}{\mu S} \quad (b).$$

Из (a) и (b)

$$\frac{\vartheta_c - \vartheta_0}{\vartheta_н - \vartheta_0} = p_0^2. \tag{21-21}$$

Таким образом, значение p_0 — минимальной кратности тока, при которой происходит срабатывание реле, зависит от темпера-



Фиг. 21, 8. Распределение температуры в пластинке при непосредственном подогреве.

туры окружающей среды. По заводским данным для реле типа ТРТ значения p_0 получаются:

$$\text{при } \vartheta_0 = 40^\circ \quad p_0 = 1{,}2;$$
$$\vartheta_0 = 20^\circ \quad p_0 = 1{,}5.$$

Для уменьшения влияния колебаний температуры внешней среды на величину p_0 надо повышать значение ϑ_c.

Рассмотрим для примера два реле: в первом $\vartheta_c = 90^\circ$, во втором $\vartheta_c = 150^\circ$.

1) 90°; $p_0 = 1{,}2$ при $\vartheta_0 = 40^\circ$; определить p_{01} при $\vartheta_0 = 20^\circ$.

$$\frac{\vartheta_c - 20}{\vartheta_c - 40} = \frac{p_{01}^2}{p_0^2}; \quad \frac{90-20}{90-40} = \frac{p_{01}^2}{p_0^2}; \quad p_{01} = 1{,}42.$$

2) 150°; $p_0 = 1{,}2$ при $\vartheta_0 = 40^\circ$; определить p_{01} при $\vartheta_0 = 20^\circ$.

$$\frac{150-20}{150-40} = \frac{p_{01}^2}{p_0^2}; \quad p_{01} = 1{,}26.$$

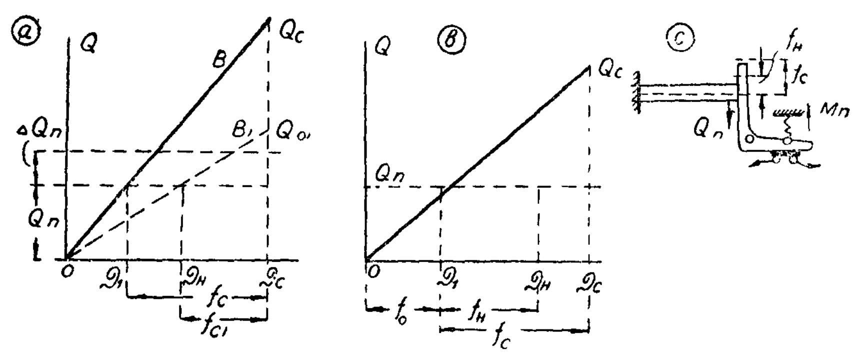
В настоящее время ряд заводов выполняет тепловые реле с учетом $\vartheta_c = 90^\circ$; однако более рационально принять ϑ_c порядка $150 \div 160^\circ$.

Коэффициент надежности. При расчете тепловых реле учитывают необходимость получения требуемой деформации биметаллической пластинки, f_c, при заданных ϑ_c и p_0. Задача может быть решена при исполнении биметалла с разной термической жесткостью $j_T = \frac{Q_T}{\vartheta}$. Увеличение значения j_T приводит к увеличению

потребляемой мощности реле, уменьшение j_T снижает устойчивость и точность работы реле. Для решения задачи выбора требуемого значения j_T введем понятие о коэффициенте надежности m, величина которого определяется из условий работы реле.

1) *Точность работы реле.* Биметаллическая пластинка при своем перемещении должна преодолевать противодействующие механические силы Q_n, значение которых определяется силами трения или действием пружин терморасцепителя.

Работа механизма иллюстрируется диаграммой, приведенной на фигуре 21, 9 *а*. Линии B и B_1 характеризуют закон изменения



Фиг. 21, 9. Диаграмма работы биметалла.

силы, создаваемой биметаллом, если пластинка не может свободно деформироваться. Углы наклона линий B и B_1 характеризуют термическую жесткость j_T и j_{T_1} пружины. При наличии противодействующей силы Q_n деформация пластинки начинается с температуры ϑ_1 или ϑ_{11}; полная деформация пластинки при температуре срабатывания ϑ_c получается соответственно f_c и f_{c1}.

При изготовлении реле могут получиться значительные отклонения ΔQ_n от расчетного значения Q_n. При этом меняются значения ϑ_1 и ϑ_{11}, а следовательно, f_c и f_{c1}, что приводит к изменению тока срабатывания.

Из диаграммы (фиг. 21, 9 *а*)

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta Q_n}{j_T}\,;\ \Delta\vartheta_1 = \frac{\Delta Q_n}{j_{T_1}}\,;\ \Delta f = 0{,}75M\,\frac{l^2}{h}\,\Delta\vartheta = 0{,}75M\,\frac{l^2}{h}\,\frac{\Delta Q_n}{j_T}\,. \quad (21\text{-}22)$$

Таким образом, при увеличении жесткости j_T уменьшается разброс точек срабатывания реле.

Коэффициент надежности

$$m = \frac{Q_c}{Q_n}, \quad (21\text{-}23)$$

где Q_c — условное значение силы на конце биметалла, при нагреве его до температуры ϑ_c и защемлении его конца.

$$Q_c = j_T\vartheta_c. \quad (21\text{-}24)$$

Из (21-23) и (21-24)

$$j_T = m\frac{Q_n}{\vartheta_c}. \quad (21\text{-}25)$$

Из условий точности работы реле принимают $m = 4 \div 5$.

2) *Вибростойкость*. При вибрациях и тряске возможны случаи отхода контактного рычага от конца биметаллической пластинки (фиг. 21, 9 *с*). При этом Q_n становится равным нулю и пластинка может дополнительно переместиться на величину f_0, определяемую из условия

$$f_0 = 0{,}75M\frac{l^2}{h}\vartheta_1. \quad (21\text{-}26)$$

При нагреве пластинки номинальным током температура получается соответственно $\vartheta_н$, а деформация $f_н$ (фиг. 21, 9 *в*).

Условием вибростойкости реле является

$$f_0 < f_c - f_н.$$

Рассмотрим критический случай

$$f_0 = f_c - f_н. \quad (21\text{-}27)$$

Так как деформации пропорциональны температурам, то из (21-27),

$$\vartheta_1 = \vartheta_c - \vartheta_н$$

или

$$\frac{Q_n}{j_T} = \vartheta_c - \vartheta_н.$$

Учитывая, что

$$\frac{\vartheta_c}{\vartheta_н} = p_0^2,$$

получаем

$$j_T = \frac{p_0^2}{p_0^2 - 1}\frac{Q_n}{\vartheta_c}.$$

Следовательно, в данном случае

$$m = \frac{p_0^2}{p_0^2 - 1} \quad (21\text{-}28)$$

и

$$j_T = m\frac{Q_n}{\vartheta_c}. \quad (21\text{-}29)$$

3) *Ударостойкость*. Наличие ускорений при ударе приводит к дополнительной деформации f_y, определяемой действием сил ускорения Q_y. Значение Q_y отнесем к величине Q_n: $Q_y = kQ_n$.

В данном случае

$$m = k\frac{p_0^2}{p_0^2 - 1}. \quad (21\text{-}30)$$

21-6. ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЛЕ

Время срабатывания тепловых реле t_c зависит от кратности перегрузки p. При заданной минимальной кратности p_0 время t_c не нормируется. В теоретических расчетах рассматривается критический случай: при p_0 время $t_c = \infty$.

Из теории нагрева однородного тела известно соотношение:

$$\vartheta = \vartheta_м (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \qquad (21\text{-}31)$$

где ϑ — переходное значение температуры нагрева тела;

$\vartheta_м$ — максимальное значение при $t = \infty$;

T — постоянная времени нагрева в секундах.

Из (21-31)

$$t = T \ln \frac{\vartheta_м}{\vartheta_м - \vartheta}. \qquad (21\text{-}32)$$

Определим время t_c срабатывания реле, которое зависит от температуры срабатывания ϑ_c.

Зависимость $\vartheta = \vartheta(I)$ без учета ϑ_0 — окружающей температуры (см. выражение 21-21)

$$\frac{\vartheta_м}{\vartheta} = p^2.$$

Согласно принятым выше определениям

$$\frac{\vartheta_м}{\vartheta_н} = p^2; \quad \frac{\vartheta_c}{\vartheta_н} = p_0^2.$$

Следовательно,

$$\vartheta_м = \vartheta_c \frac{p^2}{p_0^2}. \qquad (21\text{-}33)$$

Подставляя в (21-32) значение $\vartheta_м$ из (21-33), получаем

$$t_c = T \ln \frac{p^2}{p^2 - p_0^2}. \qquad (21\text{-}34)$$

Значение t_c — время срабатывания реле с холодного состояния биметалла.

Если биметалл предварительно нагрет током $I_н$ до температуры $\vartheta_н$, то время t_c уменьшается. Уравнение кривой нагрева в данном случае имеет вид

$$\vartheta_c = \vartheta_м (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \vartheta_н e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (21\text{-}35)$$

Разделив это выражение на $\vartheta_н$, получаем

$$\frac{\vartheta_c}{\vartheta_н} = \frac{\vartheta_м}{\vartheta_н}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + e^{-\frac{t}{T}}.$$

или

$$\rho_0^2 = p^2\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + e^{-\frac{t}{T}}$$

После проведения преобразований

$$t_c = T \ln \frac{p^2 - 1}{p^2 - p_0^2}. \qquad (21\text{-}36)$$

Если биметаллическая пластинка должна преодолевать при своем перемещении механические противодействующие силы, то время с холодного состояния (21-34) несколько увеличивается. Время охлаждения t_0 от температуры ϑ_c до $\vartheta_н$ определяется из уравнения

$$\vartheta_н = \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T}};$$

отсюда

$$t_0 = T \ln \frac{\vartheta_c}{\vartheta_н} = T \ln p_0^2. \qquad (21\text{-}37)$$

Постоянная времени нагрева тепловых реле. Время срабатывания t_c определяется в основном постоянной времени нагрева биметалла T, значение которого зависит от различных факторов:

1) от режима работы — значение T меняется при разных значениях кратности перегрузки p;

2) от способа нагрева биметалла — прямого или косвенного.

3) от условий теплоотдачи: значение μ коэффициента теплоотдачи меняется с изменением расположения биметалла и с изменением температуры нагрева.

Аналитическое определение значения T связано со значительными трудностями, необходимо провести ряд экспериментальных работ для установления в данном реле зависимости T от указанных факторов. Приближенно значение T можно определить как отношение теплоемкости тела к количеству тепла, отдаваемого во внешнее пространство.

Биметаллическая пластинка — непосредственный нагрев.

$$T = \frac{cG}{\mu S}, \qquad (21\text{-}38)$$

Здесь: c — теплоемкость тела, $\frac{вт \cdot сек}{Г\,°C}$;

μ — коэффициент теплоотдачи $\frac{вт}{см^2\,°C}$;

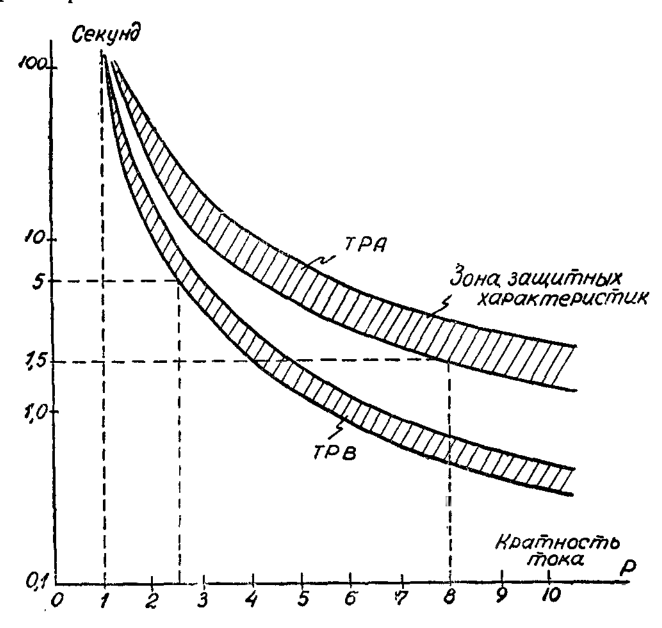
G, грамм; S — поверхность охлаждения, $см^2$.

Биметаллическая пластинка — косвенный нагрев. При нагреве пластинки от нагревательного элемента значение T увеличивается. Учет изменения T производится с помощью коэффициента β, учитывающего теплоотдачу от нагревательного элемента к биметаллической пластинке. В данном случае

$$T = \frac{cG}{\beta\mu S} \text{ секунд}. \qquad (21\text{-}39)$$

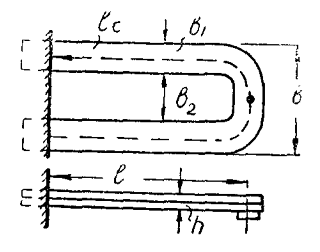
Значение $\beta < 1$ и увеличивается с приближением нагревательного элемента к биметаллу.

Для каждого исполнения теплового реле или расцепителя строится зависимость $t = t(p)$, которую называют ампер-секундной характеристикой.



Фиг. 21, 10. Ампер-секундные характеристики реле.

На фигуре 21, 10 приведены ампер-секундные характеристики реле типов ТРА и ТРВ с непосредственным нагревом биметалла. Реле ТРА предназначено для защиты электродвигателей; контрольной точкой для этого реле является $p = 8$. Реле ТРВ предназначено для защиты генераторов и силовых цепей; контрольная точка для него $p = 2{,}5$.



Фиг. 21, 11. Эскиз биметаллической пластинки.

21-7. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЛЕ И РАСЦЕПИТЕЛЕЙ

Ниже приводятся основные соотношения для биметаллических реле с прямым подогревом (фиг. 21, 11).

Исходные соотношения. Деформация свободного конца биметаллической пластинки

$$f_c = 0{,}75M \frac{l^2}{h} (\vartheta_c - \vartheta_1), \qquad (21\text{-}7)$$

где ϑ_c — температура срабатывания реле;

ϑ_1 — температура нагрева для создания на биметалле силы Q_n, преодолевающей действие внешних механических сил.

$$\vartheta_1 = \frac{Q_n}{j_T}. \qquad (21\text{-}14a)$$

Жесткость пластинки по температуре

$$j_T = \frac{3}{8} ME \frac{b_1 h^2}{l}. \qquad (21\text{-}16)$$

Учитывая m — значение коэффициента надежности, имеем

$$j_T = m \frac{Q_n}{\vartheta_c}. \qquad (21\text{-}25)$$

Электрическое сопротивление биметалла

$$r = \rho \frac{l_c}{b_1 h} \text{ ом}; \quad (\rho \text{ — ом} \cdot \text{мм}) \qquad (21\text{-}40)$$

$$l_c = 2l + b_1 + h; \qquad (21\text{-}41)$$

Поверхность охлаждения

$$S = 2(b_1 + h) l_c 10^{-2} \text{ кв. см.} \qquad (21\text{-}42)$$

Условия теплового равновесия при токе срабатывания.

$$p_0^2 I_н^2 r = \mu S \vartheta_c; \qquad (21\text{-}43)$$

с учетом (21-40) и (21-42):

$$p_0^2 I_н^2 \rho \frac{l_c}{b_1 h} = 2\mu l_c (b_1 + h) \vartheta_c \cdot 10^{-2}; \quad \left(\mu \text{ — } \frac{вт}{см^2\,°C}\right).$$

Принимая

$$k_1 = \frac{p_0^2 I_н^2 \rho \cdot 10^2}{2\mu\vartheta_c}, \qquad (21\text{-}44)$$

получаем

$$b_1 h (b_1 + h) = k_1. \qquad (21\text{-}45)$$

Учитывая

$$t = T \ln \frac{p^2}{p^2 - p_0^2} \quad (21\text{-}34); \qquad T = \frac{cG}{\mu S}, \qquad (21\text{-}38)$$

получаем

$$t = \frac{c\gamma l_c b_1 h 10^{-3}}{2\mu (b_1 + h) l_c 10^{-2}} \ln \frac{p^2}{p^2 - p_0^2}.$$

Принимая

$$k_2 = \frac{20\mu t}{c\gamma \ln \frac{p^2}{p^2 - p_0^2}}, \qquad (21\text{-}46)$$

имеем

$$\frac{b_1 h}{b_1 + h} = k_2. \qquad (21\text{-}47)$$

Из (21-16) и (21-25)

$$\frac{3}{8} ME \frac{b_1 h^2}{l} = m \frac{Q_n}{\vartheta_c}.$$

Принимая

$$k_3 = \frac{8mQ_n}{3ME\vartheta_c}, \qquad (21\text{-}48)$$

имеем

$$\frac{b_1 h^2}{l} = k_3. \qquad (21\text{-}49)$$

Из (21-7) с учетом (21-14*а*) и (21-25) имеем

$$f_c = 0{,}75M \frac{l^2}{h}\left(\vartheta_c - \frac{\vartheta_c}{m}\right).$$

Принимая

$$k_4 = 0{,}75M\vartheta_c\left(\frac{m-1}{m}\right), \qquad (21\text{-}50)$$

имеем

$$f_c = k_4 \frac{l^2}{h}. \qquad (21\text{-}51)$$

Пример расчета. (Исполнение реле см. фигуры 21, 9 и 21, 11).

Заданы: $I_н = 10\,а$; $p_0 = 1{,}3$; $p = 3$; $t = 5$ *сек*.

По конструктивным условиям $m = 5$; $Q_n = 300\,Г$.

Принимаем $\vartheta_c = 150°$; биметалл марки ТБ3;

$$M = 20 \cdot 10^{-6};\; E = 15 \cdot 10^6 \frac{Г}{мм^2};\; c = 0{,}42 \frac{вт.\ сек}{Г\,°C};$$

$$\rho_{20} = 0{,}8 \cdot 10^{-3}\ ом \cdot мм;\; \rho_{150} = 0{,}88 \cdot 10^{-3}.$$

По опытным данным для тепловых реле малых габаритов

$$\mu = 5 \cdot 10^{-3} \frac{вт}{см^2\,°C}.$$

Вычисление постоянных. Из (21-44)

$$k_1 = \frac{1{,}69 \cdot 100 \cdot 0{,}88 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 150} = 9{,}9.$$

Из (21-46)

$$k_2 = \frac{20 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 5}{0{,}42 \cdot 81 \ln \frac{9}{9 - 1{,}69}} = 0{,}712.$$

Из (21-48)

$$k_3 = \frac{8 \cdot 5 \cdot 300}{3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 150} = 8{,}9 \cdot 10^{-2}.$$

Из (21-50)

$$k_4 = 0{,}75 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot \frac{4}{5} = 1{,}8 \cdot 10^{-3}.$$

Вычисление b_1 и h (из (21-45) и (21-47)).

$$b_1 h (b_1 + h) = 9{,}9;\quad \frac{b_1 h}{b_1 + h} = 0{,}712.$$

Из этих выражений после решения квадратного уравнения получаем $h = 1{,}86 \pm 0{,}89$; принимая меньшее значение h и округляя его, получаем $h = 1$ *мм*, тогда $b_1 = 2{,}66$; $b = 2b_1 + b_2 = 8$ *мм*.

Вычисление l. Из (21-49)

$$\frac{b_1 h^2}{l} = 8{,}9 \cdot 10^{-2}; \quad l \cong 30 \text{ мм}.$$

Вычисление f_c. Из (21-51)

$$f_c = 1{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 900 = 1{,}62 \text{ мм}.$$

Потери в биметалле при номинальном токе.

$$P = I_н^2 r = 100 \frac{0{,}85 \cdot 10^{-3} \cdot 63{,}66}{2{,}66} = 2{,}05 \text{ вт},$$

где $\rho = 0{,}85 \cdot 10^{-3}$ принято при $\vartheta_н$, соответствующей $I_н$.

21-8. ТЕРМОРЕЛЕ И РЕГУЛЯТОРЫ

Термореле и терморегуляторы работают в функции температуры окружающей среды. Такие устройства называют также термостатами. Термореле применяются для защиты различных устройств при превышении температуры в этих устройствах сверх допустимой. Терморегуляторы предназначаются для поддержания постоянным значения температуры регулируемого объекта: электрической печи, прессформы для пластмасс и других.

Основные технические требования. Принципы построения термореле и терморегуляторов одинаковы. Однако при конструировании этих устройств учитывают особые требования, предъявляемые к реле и регуляторам.

1) Коэффициент возврата — отношение температуры отпуска к температуре срабатывания реле. Терморегуляторы должны обладать высоким коэффициентом возврата — порядка 0,97—0,98, так как это условие определяет точность регулирования. К термореле такие требования не предъявляются.

2) Влияние скорости изменения температуры окружающей среды. Конструкция должна быть выполнена так, чтобы точность работы устройства незначительно уменьшалась при больших скоростях изменения температуры окружающей среды. Гарантийные данные точности для регуляторов приводятся к скорости порядка $0{,}5 - 1 \frac{град}{мин}$. И эта скорость незначительна, в ряде случаев наблюдается скорость порядка $50 \div 100 \frac{град}{мин}$.

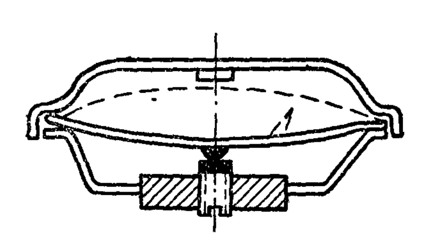
3) Контактная система должна выполняться так, чтоб осуществлялся мгновенный разрыв цепи. Это требование удовлетворяется в ряде конструкций термореле применением так называемых опрокидывающихся биметаллических шайб и пластин

При этом, однако, уменьшается значение коэффициента возврата, вследствие чего терморегуляторы часто выполняют с медленно расходящимися контактами. Такие контакты обладают незначительной коммутирующей способностью; при применении металлокерамических контактов допускается значительная нагрузка. Так, в терморегуляторах для утюгов с медленно расходящимися металлокерамическими контактами осуществляется надежное размыкание цепи 220 *в* переменного тока с электрической нагрузкой 600 *вт*.

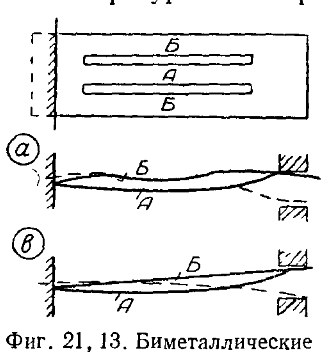
4) Регулирование уставки. Терморегуляторы должны снабжаться устройством для изменения уставки температуры срабатывания в значительных пределах. Так, в регуляторе ТР200 осуществляется регулирование в пределах от 20 до 200°. Такое требование не предъявляется к конструкции термореле. Обычно такие реле выполняются для определенной температуры срабатывания, должна быть только предусмотрена возможность корректировки при градуировке устройства.

Биметаллические термостаты применяются для контроля температуры до 250°.

На фигуре 21, 12 приведен эскиз термореле с шайбой. Шайба выполнена так, чтобы она была изогнута в холодном состоянии. При нагреве и достижении критической температуры шайба резко опрокидывается и размыкает контакты (см. пунктир); возврат в исходное положение получается при охлаждении шайбы. Регулирование температуры срабатывания осуществляется контактным винтом.



Фиг. 21, 12. Термореле с опрокидывающейся шайбой (*1*).

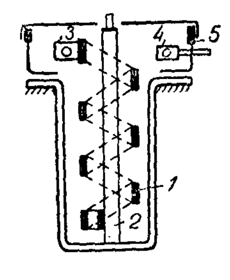


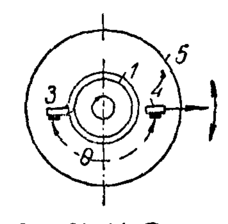
Фиг. 21, 13. Биметаллические пластинки:

а — с гофрированными краями, *b* — с деформированной средней частью.

В качестве измерительных элементов применяют также опрокидывающиеся биметаллические пластинки (фиг. 21, 13). В такой пластинке с прорезями внешние части гофрируют, вследствие чего внутренняя часть *А* изгибается. При нагреве эта часть стремится изогнуться в сторону уменьшения радиуса кривизны. Изгибу препятствуют сжимающие крайние части. При определенной критической температуре средняя часть скачком перегибается в обратную сторону (см. пунктир).

Другое исполнение пластинки, примененное в термореле ХПИ, приведено на фигуре 21, 13*b*. Средняя часть пластинки растягивается под прессом, пластинка обладает свойствами гофрированной, но технология изготовления ее значительно проще. При конструировании термореле обращают особое внимание на то, чтобы перепад температуры между корпусом и биметаллической пластинкой был минимальным. Это условие весьма важно при применении реле в качестве устройства защиты обмоток электродвигателей. Реле укрепляется на головке статора асинхронного двигателя.





Фиг. 21, 14. Термобиметаллический регулятор:

1 — спираль, 2 — стержень; 3 — контакт спирали; 4 — контакт.

При нормальном режиме работы двигателя перепад температуры между обмоткой и биметаллическим элементом невелик — порядка 10 ÷ 15°. При резких перегрузках или коротких замыканиях, когда скорость изменения температуры обмотки достигает величин порядка $50 \frac{°C}{мин}$, перепад температуры резко увеличивается.

При выполнении обмотки двигателя с изоляцией класса *А* предельная допустимая температура равна 105°; практически допускают кратковременное превышение температуры до 160°. Таким образом, перепад температуры между обмоткой двигателя и измерительной частью реле при токах короткого замыкания не должен превосходить 55 ÷ 70°. Это условие выполняется при установке реле в тихоходных двигателях (до 1000 *об/мин*), в двигателях более быстроходных имеют место весьма большие скорости изменения температуры (при включении на сеть заторможенного двигателя) — перепад температуры между обмоткой и реле достигает 100—120°.

Исполнение терморегулятора для электрических печей и прессформ приведено на фигуре 21, 14. Биметаллический элемент в виде спирали закреплен внизу на оси. В верхней части спирали имеется контакт. Угол перемещения свободного конца спирали Θ регулируется перемещением в корпусе (*5*) регулировочного винта (*4*). В имеющихся исполнениях таких регуляторов пределы регулирования 25 ÷ 250°, точность ± 2 ÷ 3°.

Дилатометрические термостаты. Работа этих устройств основана на разности линейных перемещений при нагреве двух разных металлов. В качестве термоинертных материалов применяют: при температурах до 200° — инвар (при более высоких температурах коэффициент линейного расширения инвара, α, резко возрастает — см. таблицу 30); при температурах больше 200° — до 1000° — кварц, фарфор, обладающие весьма низким коэффициентом $\alpha = 5 \cdot 10^{-7}$. В качестве термоактивных материалов применяют:

в интервале температур 0÷400° — латунь, $\alpha = 21 \cdot 10^{-6}$; в интервале температур 0÷1000° — никель, $\alpha = 16 \cdot 10^{6}$.

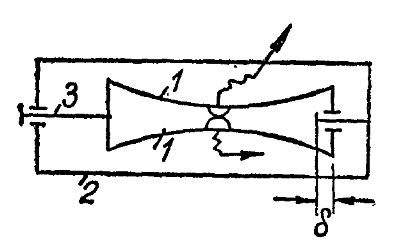
Таблица 30

Коэффициенты линейного расширения инвара

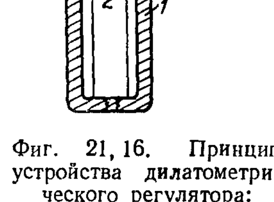
Пределы температур	—100—0	0—100	100—200	250—350	300—400	400—500
Коэффиц. на 1°C	$1{,}06 \cdot 10^{-6}$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$	$2{,}8 \cdot 10^{-6}$	$9{,}6 \cdot 10^{-6}$	$13{,}7 \cdot 10^{-6}$	$16{,}1 \cdot 10^{-6}$

Дилатометрические термостаты исполняют в качестве реле и регуляторов.

Принцип устройства регулятора ТР-200 иллюстрируется фигурой 21, 15. Две пластинки из инвара (*1*) изогнуты так, что в холодном состоянии они смыкаются, создавая давление на контактах. При нагреве латунной трубки последняя удлиняется больше пластинок инвара,



Фиг. 21, 15. Принцип устройства терморегулятора ТР-200:
1 — пластинка из инвара; *2* — латунная трубка; *3* — регулировочный винт.



Фиг. 21, 16. Принцип устройства дилатометрического регулятора:
1 — трубка; *2* — стержень.

которые растягиваются и разрывают контактную цепь. Регулировка уставки от 25÷200° осуществляется винтом *3*. Погрешность ±5° при скорости изменения температуры окружающей среды не более $5 \frac{град}{мин}$.

Другое исполнение дилатометрического регулятора приведено на фигуре 21, 16.

ГЛАВА 22

ПРУЖИНЫ

22-1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Пружина, как правило, является составной частью каждого электромеханического реле. Пружина может быть использована в качестве элемента контактной системы, в качестве противодействующего устройства — для возврата якоря или диска, в качестве промежуточного звена для гибкой связи двух деталей, в качестве аккумулятора энергии — заводные пружины. Различают следую-

щие основные виды пружин, отличающиеся между собой или исполнением, или характером деформации.

Прямые и изогнутые пружины (фиг. 22, 1; 22, 2; 22, 5) имеют вид балки, закрепленной в одном конце или посредине, и исполняются из материала с прямоугольным или круглым сечением. При работе пружины в материале возникают напряжения изгиба — пружина работает на изгиб. Прямые и изогнутые пружины применяются в реле в основном в качестве элементов контактной системы. Иногда такие пружины ставят для передачи силы при незначительном почти прямолинейном ходе, например, в запорных собачках или тормозах.

Винтовые цилиндрические пружины (фиг. 22, 9) получаются при навивке проволоки вокруг цилиндрического стержня по винтовой линии. При работе пружины в материале возникают деформации кручения. В зависимости от способа крепления пружины и воздействия на нее внешних сил различают: 1) пружины, работающие на растяжение; 2) пружины, работающие на сжатие.

Винтовые конические пружины (фиг. 22, 19) получаются при навивке проволоки вокруг конического стержня. В плане такая пружина имеет вид спирали. В материале пружины возникают напряжения кручения и среза. Конические пружины обладают по сравнению с цилиндрическими большей устойчивостью от деформаций на боковой изгиб.

Винтовые цилиндрические пружины, работающие на изгиб (фиг. 22, 20). В винтовой цилиндрической пружине, закрепленной так, что при действии пружины оба конца ее поворачиваются вокруг оси стержня, происходят деформации изгиба — пружина работает на изгиб.

Спиральные пружины (фиг. 22, 22) получаются при изгибе плоского ленточного материала в виде спирали. При работе пружины в материале ее возникают деформации изгиба. Спиральные пружины служат для сообщения какой-либо вращающейся оси крутящего момента: одним своим концом пружина прикрепляется к оси, другим — к какой-либо неподвижной точке.

Спиральные заводные пружины (фиг. 22, 24) играют роль аккумуляторов энергии и являются приводными пружинами в разных устройствах. Метод расчета спиральных заводных пружин несколько отличается от метода расчета обычных спиральных пружин.

22-2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИН

Виды материалов. В качестве материалов для изготовления пружин применяются или специальные сорта стали — ленточная пружинная сталь, рояльная проволока, или специальные сплавы меди — фосфористая бронза, латунь, бериллиевая бронза, нейзильбер, куниаль и другие. Выбор материала для пружины определяетс механическими и электрическими свойствами этих материалов

Электро- и теплопроводность. При работе пружины в качеств

элемента контактной системы необходимо выбрать материал с относительно большой электро- и теплопроводностью, например фосфористую бронзу, латунь.

Модуль упругости. При наличии относительно больших сил в системе и требующемся небольшом прогибе пружины применяется сталь (модуль упругости стали $E = 20 \times 10^3$ *кГ/мм²*). Наоборот, если нужно получить относительно большой прогиб пружины при незначительных по величине силах, применяются материалы с меньшим значением модуля упругости, например фосфористая бронза (модуль упругости бронзы $E = 11 \cdot 10^3$ *кГ/мм²*).

Значение допускаемых напряжений. В том случае, если при работе пружины возможны относительно большие деформации ее — прогиб, растяжение, закручивание, — следует выбирать материалы с относительно большими значениями допускаемых напряжений.

В релестроении применяются следующие материалы.

1) Пружинная стальная углеродистая проволока по ГОСТ 5047—49, холоднотянутая диаметром от 0,2 до 8 *мм*, применяемая для изготовления пружин, навиваемых в холодном состоянии и не подвергаемых закалке. В зависимости от предела прочности при растяжении эта проволока изготовляется трех классов: Н — нормальной прочности, П — повышенной, В — высокой.

2) Проволока стальная углеродистая. ГОСТ В 1546—42 марки ОВС — особо высокого сопротивления и ВС — высокого сопротивления.

3) Ленточные стали 60С2А, 65Г и У8А по ГОСТ 2283—43 для изготовления плоских пружин.

4) Ленточная сталь 70С2 × А по ГОСТ 2283—43 для изготовления спиральных заводных пружин. Для этих пружин применима сталь У8А, У10А.

5) Фосфористая бронза — ГОСТ 1761—50 для плоских и спиральных пружин.

6) Ленты из нейзильбера ГОСТ 5187—49.

7) Бериллиевая бронза — ленты ГОСТ 1789—50, проволока по ЦМ/ТУ 673—41, обладающая высокими механическими свойствами.

8) Бронза $КМ_5$ 3-1 — ленты ГОСТ 4748—59, проволока ГОСТ 5222—50, дешевле фосфористой и бериллиевой бронзы; широко применяется для изготовления плоских пружин.

Выбор допускаемых напряжений. При выборе рассматриваются три категории нагрузки пружин: I — постоянная, II — повторная, пульсирующая, одного знака, III — знакопеременная. Среднее значение допускаемых напряжений:

$$R_{I\,изг} = \frac{\sigma_b}{2};\quad R_{II\,изг} = \frac{\sigma_b}{3};\quad R_{I\,кр} = \frac{3}{4}R_{I\,изг};\quad R_{II\,кр} = \frac{4}{5}R_{II\,изг},$$

где σ_b — $\frac{кГ}{мм^2}$ — предел прочности при растяжении. Для ответственных пружин принимается больший запас прочности:

$$R_{I\,изг} = \frac{\sigma_b}{2,5};\quad R_{II\,изг} = \frac{\sigma_b}{4};\quad R_{I\,кр} = \frac{3}{4}R_{I\,изг};\quad R_{II\,кр} = \frac{4}{5}R_{II\,изг}.$$

При исполнении спиральных моментных пружин принимают весьма высокие запасы прочности — от 5 до 12.

Данные электро- и теплопроводности и допускаемых напряжений приведены в таблицах 31 и 32.

Таблица 31

Электропроводность и теплопроводность материалов

Материал	Электропроводность в % к проводимости чистой меди	Теплопроводность $\frac{кал}{см^2 \cdot °C/см}$	
Медь	98	09—0,94	ρ — чистой меди равно $0{,}018\ ом\frac{мм^2}{м}$ (при 20°С)
Фосфористая броиза . .	13	0,15—0,20	
Бериллиевая бронза . .	23—25	0,25	
Латунь	25	0,31	
Сталь	9	0,15	

Таблица 32

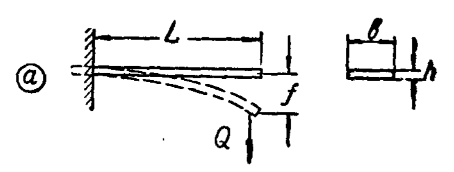
Допускаемые напряжения при расчете пружин

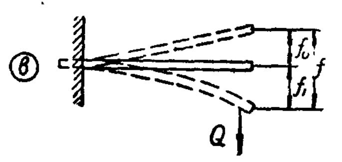
Материал	Марка	Предел прочности при растяжении σ_b	Допускаемые напряжения $\frac{кГ}{мм^2}$				Модули	
			на кручение		на изгиб		E $кГ/мм^2$	G $кГ/мм^2$
			$R_{I\ кр}$	$R_{II\ кр}$	$R_{I\ изг}$	$R_{II\ изг}$		
Стальная проволока ГОСТ 5047—49	В II ∅ 0,2—0,6	265	80	50	95	65	20·10³	8·10³
	В II ∅ 0,7—1,5	220 260	75	45	90	60		
	П—II ∅ 1—3,0	160—195	55	36	70	45		
Сталь 65Г, У8А, 60С2А			53	35	65	45	20·10³	8·10³
Броиза фосфористая	ОФ 6,5—0,15		21	15	26	18	10·10³	4·0—10³
Броиза бериллиевая	БрБ2		25	18	31	22	12,5·10³	5·10³
Нейзильбер	65—20 НМЦ		18	13				5·1—10³
Бронза	КМЦ 3—1		21	15	26	18	12·10³	4,8—10³

Сортамент проволоки по ГОСТ 5047—49:
∅ 0,2, 0,22, 0,25, 0,28, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45, 0,5, 0,55, 0,6, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,8, 2,0.

22-3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ВОПРОСЫ

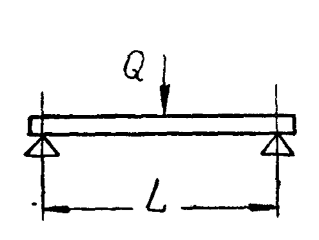
а) Прямые и изогнутые пружины. Прямые пружины чаще всего исполняются в виде консольной балки (фиг. 22, 1). В ряде случаев плоская пружина устанавливается при отсутствии внешней нагрузки не свободно, а имеет предварительный изгиб в обратную сторону на величину f_0 (фиг. 22, 1 *в*). Этот предварительный изгиб может быть осуществлен либо каким-нибудь упором, либо подгибом пружины, т. е. приданием ей предварительного натяжения f_0. Общий прогиб f пружины равен предварительному прогибу f_0 плюс полезный прогиб f_1. Полезный прогиб считаем от горизонтального положения вниз. Сила Q, требующаяся для получения полезного прогиба f_1, определяется из условия прогиба на величину $f = f_0 + f_1$.



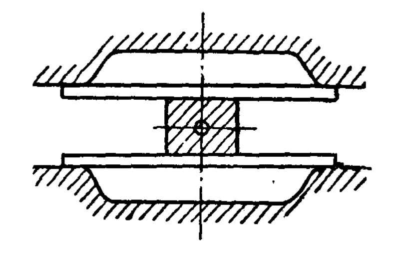


Фиг. 22, 1. Прямая пружина:
а — без предварительного изгиба;
b — с предварительным изгибом.

Прямая пружина, нагруженная посредине (фиг. 22, 2). Такие пружины применяются в качестве элементов контактных систем или в качестве защелки, когда требуется фиксация положения оси какого-либо переключающего устройства (фиг. 22, 3). В этом случае ось переключателя исполняется в виде квадрата. При расчете таких пружин исходят из



Фиг. 22, 2. Прямая пружина, нагруженная посредине.

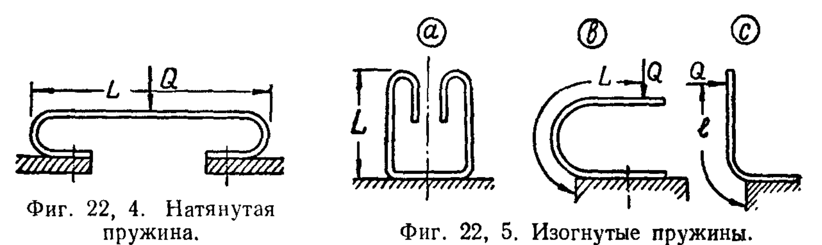


Фиг. 22, 3. Прямая пружина в качестве защелки.

предположения, что пружина зажата в средней части и на каждом конце загружена силой $\frac{Q}{2}$.

Натянутые пружины (фиг. 22, 4). Исполняются в виде листовых пружин, закрепленных на обоих концах; сила приложена посредине. В этом случае применяются формулы изгиба для балок, укрепленных на двух концах.

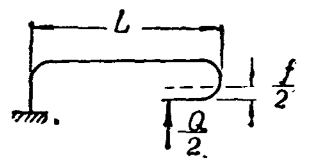
Изогнутые пружины (фиг. 22, 5). Расчет таких пружин производится аналогично прямым — их рассматривают как консольные балки, но допускаемое напряжение изгиба $R_{изг}$ принимается с бо́льшим коэффициентом запаса.

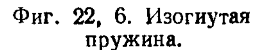


Фиг. 22, 4. Натянутая пружина.

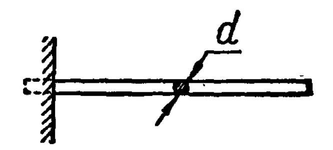
Фиг. 22, 5. Изогнутые пружины.

Крепление прямых пружин обычно осуществляется двумя винтами или заклепками. При креплении одним винтом необходимо принимать меры против проворачивания пружины. Отверстия для



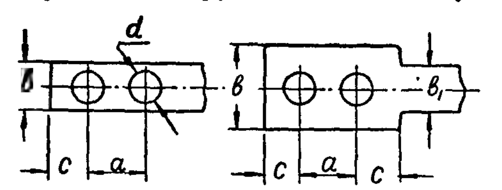


Фиг. 22, 6. Изогнутая пружина.

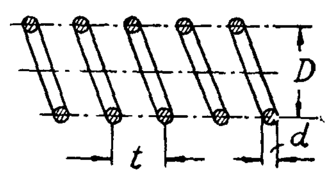


Фиг. 22, 7. Прямая пружина круглого сечения.

крепления в пружине производятся штамповкой или сверлением. При этом в некоторых случаях требуется производить отжиг или отпуск конца пружины, соответствующего месту крепления.



Фиг. 22, 8. Крепление пружин.



Фиг. 22, 9. Пружина с шаговой навивкой.

Таблица 33

	Крепление	
	винтами	заклепками
d	0,5 *b*	0,3 *b*
a	От 3 до 4*d*	
c	0,5 *b*	

В некоторых случаях пружина в месте крепления выполняется более широкой (фиг. 22, 8), однако следует по возможности избегать резких изменений сечения. Рекомендуемые данные расположения отверстий и их размеров приводятся в таблице 33 в соответствии с обозначениями фигуры 22, 8 (*d*, *a*, *c*).

Рекомендуется крепить пружины посредством прижимных пластинок (фиг. 22, 10). Края пластинок, подкладок и других деталей, к которым прижимается пружина, следует закруглять.

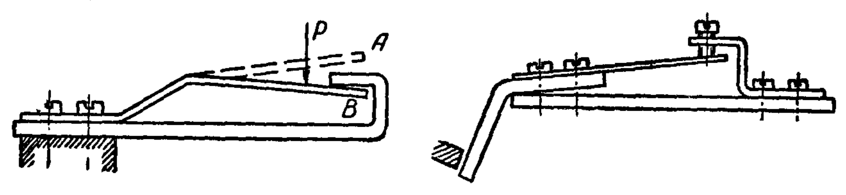
Свободные концы пружин, перемещающиеся по плоскостям (фиг. 22, 11), должны быть загнуты или иметь закругления, что предохраняет пружину от заклинивания и поломки.



Фиг. 22, 10. Крепление пружин прижимными пластинками.

Фиг. 22, 11. Исполнение свободных концов пружин.

Предварительное натяжение пружины осуществляется отгибом ее в сторону, противоположную действию силы. В некоторых случаях для уменьшения хода пружины свободный конец ее удерживается упорной пластинкой. Такое исполнение показано на фигуре 22, 12.



Фиг. 22, 12. Пружина с предварительным изгибом:

А — свободное состояние пружины.

Фиг. 22, 13. Устройство для регулирования нажатия пружины.

Регулирование нажатия пружины осуществляется винтами (фиг. 22, 13).

Изогнутые пружины следует изготовлять с определенным минимальным радиусом *r* закругления в месте изгиба.

Рекомендуемые минимальные значения r зависят от рода материала, толщины листа и направления штамповки: перпендикулярно или параллельно направлению вальцовки листа, из которого изготовляется пружина.

1) При штамповке перпендикулярно направлению вальцовки

$r_{макс} = 4h$ — для стальных пружин;

$r_{мин} = h$ — для пружин из латуни или фосфористой бронзы.

2) При штамповке параллельно направлению вальцовки

$r_{мин} = 8h$ — для стали;

$r_{макс} = 3h \div 5h$ — для фосфористой бронзы или латуни.

Термическая обработка. Плоские пружины, в которых необходимо вырубить отверстия, а также изогнутые пружины штампуют, как правило, в отожженном состоянии. После штамповки пружина подвергается закалке. Закалка пружин из ленточной стали производится в соляных ваннах при температуре 780—800° в течение 1—3 минут, охлаждение пружин — в масле при комнатной температуре. После закалки пружины дополнительно подвергаются отпуску в селитренной или масляной ванне, в зависимости от требуемой твердости. Обычно получается твердость в пределах $40 \div 55 R_c$; соответственно этому температуры отпуска порядка 400—275°.

Для предохранения стальных пружин от коррозии их покрывают защитным слоем в гальванических ваннах. В этом случае возможно наводороживание металла, поэтому пружина должна пройти процесс обезводороживания в масляной ванне при температуре $210 \pm 10°$ с выдержкой в течение 5 часов.

Штамповка и гнутье пружин из бериллиевой бронзы осуществляются в закаленном (мягком) их состоянии. Режим закалки: нагрев до температуры 750—780°, выдержка при этой температуре в течение 40—50 минут и охлаждение в холодной воде. После штамповки пружина подвергается облагораживанию (старению). Режим облагораживания: нагрев до 300° с выдержкой при этой температуре в течение 8—9 часов, охлаждение в спокойном воздухе.

Аналогичные процессы проводятся и с другими пружинами из цветных сплавов, например из куниаля.

б) Винтовые цилиндрические пружины. Такие пружины чаще всего изготовляются из проволоки круглого сечения. В релестроении применяются пружины с небольшим шагом витка, поэтому при определении напряжений в поперечном сечении витка пружины считают, что каждый отдельный виток расположен в плоскости, перпендикулярной к оси витка.

Соотношение основных геометрических размеров пружин. Следующие геометрические размеры являются основными для винтовых цилиндрических пружин: средний диаметр витка D, длина пружины L и диаметр проволоки d.

Характерными параметрами пружины принято считать следующие:

$$\frac{D}{d} = c_1; \quad \frac{L}{D} = c_2.$$

В рационально исполненных пружинах величины c_1 и c_2 находятся в определенных пределах. В обычном исполнении пружин

$c_1 = 5 \div 10;$

$c_2 \leqslant 5.$

Важно выдерживать второе условие для значения c_2 в пружинах, работающих на сжатие. Когда $c_2 > 5$ при работе пружины может получаться боковое выпучивание. При этом создается трение в витках, искажающее характеристику пружины. При проектировании пружин рекомендуется выбирать следующие размеры D и d: $D \rightarrow 5$; 6; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 62 *мм*; $d \rightarrow 0{,}3$; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,5; 3; 4,5; 6 *мм*.

Винтовая пружина, работающая на растяжение. Навивка цилиндрических винтовых пружин растяжения может быть осуществлена двумя способами.

1. Закрытая навивка исполняется так, чтобы витки пружины соприкасались друг с другом с некоторым натяжением. Последнее условие достигается тем, что при закручивании вокруг стержня навивки проволоку вращают одновременно и вокруг своей оси. Сила натяжения пропорциональна углу поворота α проволоки вокруг оси. Пружины с закрытой навивкой работают с предварительным натяжением, которое они получают в процессе изготовления. Для удаления витков друг от друга надо приложить силу Q_0, компенсирующую предварительное натяжение. Применяются такие пружины в тех случаях, когда требуется получить большую силу растяжения при малой длине пружины.

2. Шаговая навивка исполняется так, что в готовой навитой пружине имеется расстояние между витками — шаг t (фиг. 22, 9).

В определенной конструкции аппарата работа пружины характеризуется обычно двумя положениями: начальным и конечным. Начальному положению пружины может соответствовать или свободное состояние пружины, или предварительное растяжение. При свободном состоянии пружины начальная сила Q_0 будет соответственно равна (фиг. 22, 14):

$Q_н = Q_0$ — для пружины с предварительным натяжением (закрытая навивка);

$Q_н = 0$ — для пружины с шаговой навивкой.

Для пружин с предварительным растяжением начальная сила определяется величиной начального растяжения f_1, а в пружинах с предварительным натяжением еще дополнительно величиной f_0, соответствующей силе Q_0:

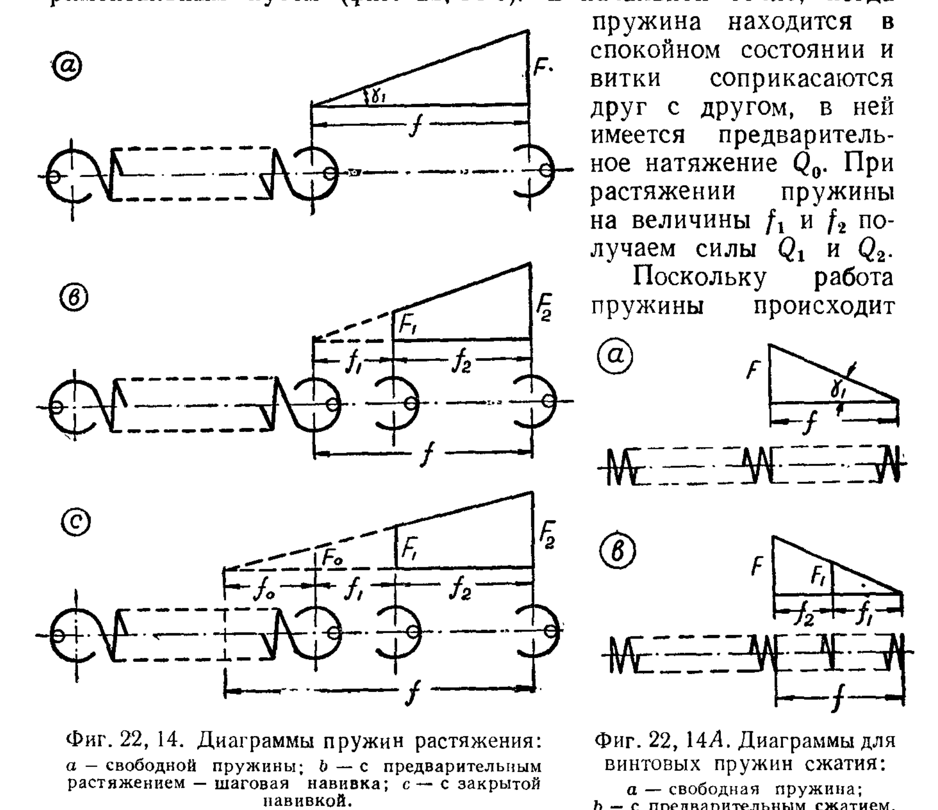
$Q_н = kf_1$ — для пружин с шаговой навивкой;

$Q_н = k(f_0 + f_1)$ — для пружин с закрытой навивкой.

Значение силы Q_0 не может быть найдено аналитически, так как ее величина зависит не только от размеров пружины, но

и от процесса навивки. Как указывалось выше, значение Q_0 зависит от угла α поворота проволоки при навивке. Обычно значение Q_0 определяется по диаграмме пружины, полученной экспериментальным путем (фиг. 22, 14 c). В начальной точке, когда пружина находится в спокойном состоянии и витки соприкасаются друг с другом, в ней имеется предварительное натяжение Q_0. При растяжении пружины на величины f_1 и f_2 получаем силы Q_1 и Q_2.

Поскольку работа пружины происходит



Фиг. 22, 14. Диаграммы пружин растяжения: a — свободной пружины; b — с предварительным растяжением — шаговая навивка; c — с закрытой навивкой.

Фиг. 22, 14A. Диаграммы для винтовых пружин сжатия: a — свободная пружина; b — с предварительным сжатием.

в пределах упругих деформаций, все значения Q_0, Q_1 и Q_2 пропорциональны величинам f_0, f_1 и f_2 (см. диаграммы фиг. 22, 14):

$$\frac{f_0}{f_0+f_1+f_2}=\frac{Q_0}{Q_2};\ f=f_0+f_1+f_2;\ Q_0=\frac{f-(f_1+f_2)}{f}Q_2.$$

Обычно пружины с предварительным натяжением (с закрытой навивкой) исполняют так, что сила Q_0 создает в материале пружины напряжение τ порядка 15 $кГ/мм^2$ (для стали).

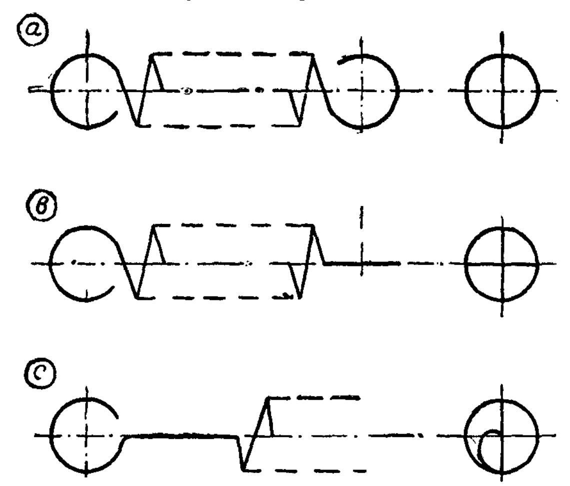
В предварительных расчетах пружин принимают ориентировочно:

$$Q_0=\frac{Q_{макс}}{3}\text{ — для пружин с диаметром проволоки } d<5\text{ мм}.$$

$$Q_0=\frac{Q_{макс}}{4}\text{ при } d>5\text{ мм}.$$

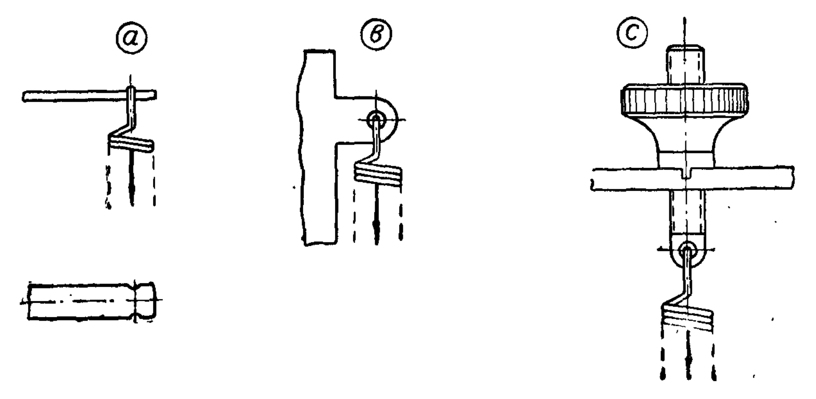
Шаг пружины растяжения (при шаговой навивке) принимается обычно равным диаметру проволоки.

Концы пружины исполняются в виде отдельных витков (фиг. 22, 15), которые должны быть расположены по оси пружины. Оба концевых витка могут быть расположены в одной плоскости



Фиг. 22, 15. Заделка концов пружины растяжения.

или в разных: один виток повернут в этом случае на 90°. По конструктивным соображениям приходится иногда удлинять конец пружины (фиг. 22, 16 *c*).



Фиг. 22, 16. Формы крепления пружин растяжения.

Концы пружины укрепляют на деталях аппарата, изображенных на фигуре 22, 16.

Концевые витки также принимают участие в работе пружины. При расчете пружины оба концевых витка считают за один виток.

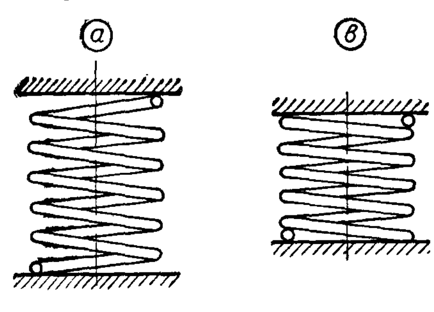
Для пружин с предварительным растяжением величины растяжений (фиг. 22, 14)

$$f_1 = f_2 \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}; \quad f = f_2 \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1}.$$

Для пружин с предварительным натяжением и предварительным растяжением (фиг. 22, 14 *c*).

$$f = f_0 + f_1 + f_2;$$

$$Q_0 = Q_2 \frac{f - (f_1 + f_2)}{f}.$$



Фиг. 22, 17. Заделка концов пружины сжатия.

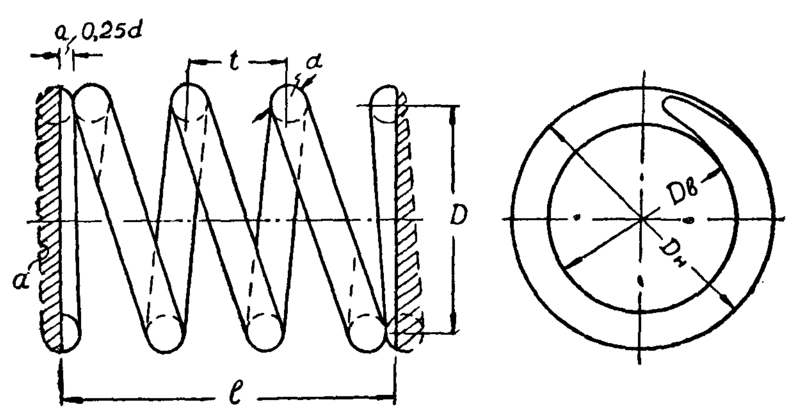
Винтовые пружины, работающие на сжатие. Длина пружины L должна быть не более $5D$. Величина t шага не нормируется. Принятые в практике значения $t = \frac{D}{2} \div \frac{D}{3}$.

Заделка концов. Возможны три исполнения:

1. Свободное (фиг. 22, 17*a*). Применяется редко.

2. Концевые витки частично навиты без уклона, поджаты (фиг. 22, 17 *b*). При таком исполнении устраняется опасность искривления пружины моментом, определяемым силой Q и радиусом пружины. Применяется в пружинах из проволоки $d < 0{,}5$ *мм.*

W = 4,5 ; W_D = 2,5



Фиг. 22, 18. Заделка концов пружины сжатия.

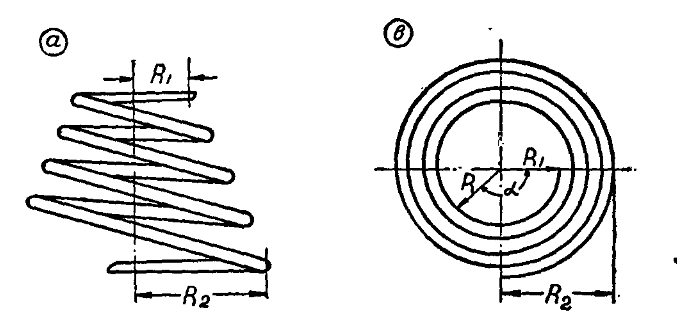
3. Концевые витки поджаты и подшлифованы. Крайние, нерабочие витки поджимаются к рабочим и сошлифовываются до размера $0{,}25d$ (фиг. 22, 18). Применяется в пружинах из проволоки $d > 0{,}5$ *мм.*

Пружина удерживается в своем положении соответствующими частями аппарата. В ряде случаев для удержания пружины приходится ставить специальные шайбы или приспосабливать детали аппарата для этой цели, делая в них специальные выемки или выступ.

Защита от коррозии. Пружины из проволоки диаметром от 0,2 до 0,5 *мм* покрываются черным лаком методом окунания с последующей сушкой в печи, где температура поднимается равномерно от 50 до 220°; выдержка в печи длится 30 минут. Получается твердая лаковая пленка черного цвета. Пружины из проволоки диаметром выше 0,5 *мм* цинкуют, толщина покрытия порядка 10—15 микрон.

Термическая обработка. Готовые пружины подвергаются термической обработке для снятия внутренних напряжений, получающихся после процесса навивки, а также для обезводороживания пружин, прошедших гальванические ванны. Термическая обработка производится в масляной ванне при температуре порядка $210 \pm 10°$ с выдержкой в течение 5 часов. Пружины, подлежащие окраске, должны быть подвергнуты термической обработке до процесса покраски.

в) Винтовые конические пружины по сравнению с цилиндрическими пружинами сжатия обладают большей устойчивостью

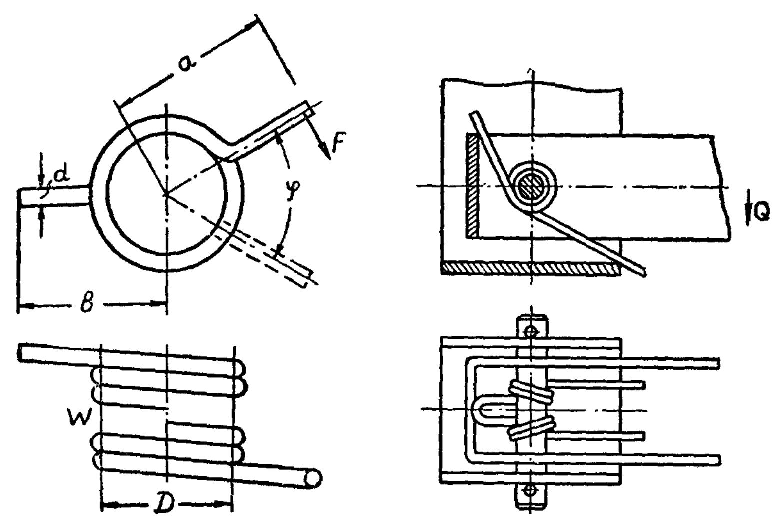


Фиг. 22, 19. Коническая винтовая пружина:
а — вид спереди; *b* — план.

против бокового изгиба. Винтовая коническая пружина состоит из винтовых витков, как бы навитых на круговой направляющий конус (фиг. 22, 19). Концы пружины замкнуты в круг и для того, чтобы обеспечить прилегание их по всей периферии к опорным плоскостям, сошлифовываются. Конические пружины могут иметь два исполнения — с постоянным шагом и с постоянным углом наклона. Горизонтальная проекция пружины с постоянным шагом представляет собой архимедову спираль с постоянным углом наклона — логарифмическую.

В практике релестроения приняты пружины с постоянным шагом.

г) Винтовые пружины, работающие на изгиб. В винтовой пружине, исполненной так, что оба ее конца поворачиваются вокруг оси (фиг. 22, 20), происходит деформация изгиба — пружина работает на изгиб. С целью уменьшения передачи сил на ось следят за тем, чтобы оба конца пружины при монтаже ее были параллельны, витки должны свободно поворачиваться вокруг стержня. Обычно бывает достаточно, чтобы пружина своими свободными концами только прилегала к штифту неподвижной части



Фиг. 22, 20. Винтовая пружина, работающая на изгиб.

Фиг. 22, 21. Винтовая двойная пружина.

или к краю неподвижной части механизма. Для более равномерного распределения сил, действующих на ось, пружину исполняют двойной (фиг. 22, 21).

д) Спиральные моментные пружины. Спиральные пружины применяются для сообщения какой-либо оси крутящего момента. Исполняются такие пружины в виде завитой в форме спирали плоской ленты. Один конец пружины — внутренний — закрепляется на оси (фиг. 22, 22). Для перемещения наружного конца A на угол φ вокруг оси требуется сила Q на плече $R_н$. На ось тогда действует крутящий момент

$$M = QR_н.$$

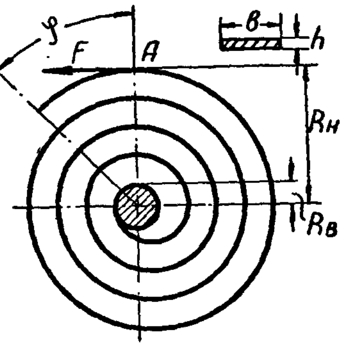
При этом безразлично, происходит ли вращение по часовой стрелке или против нее, т. е. свертывается ли пружина — заводится, или развертывается — отдает работу. В материале пружины получаются напряжения изгиба.

Ход расчета. Обычно спиральная пружина характеризуется моментом, требующимся для поворота конца A пружины

на 90°. При этом безразлично, завертывается или развертывается пружина. Угол закручивания в действительных условиях работы пружины бывает значительно больше 90°. Значение предельного допустимого угла закручивания ограничивается двумя условиями:

1. При увеличении закручивания повышается напряжение материала ;. Требуется, чтобы остаточная деформация материала не превышала при этом определенной величины (порядка 0,1%).

2. При значительном угле закручивания пружины (порядка 360° и выше) уменьшается расстояние a между витками. Необходимо следить за тем, чтобы витки пружины не соприкасались, так как при этом вследствие возникающего добавочного момента трения меняется характеристика пружины. При расчете задаются моментом пружины, определяемым данными конструкции аппарата, и материалом пружины. Для пружин с относительно большим моментом применяется ленточная сталь.



Фиг. 22, 22. Спиральная пружина.

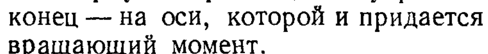
В электромеханических реле — электромагнитных, индукционных, электродинамических — применяются материалы с меньшим модулем упругости — фосфористая бронза, нейзильбер, куниаль и другие сплавы. В тех случаях, когда пружина является токоведущей, применяются материалы с меньшим удельным сопротивлением, например кадмиевая медь, серебро (для пружин с малым моментом). Выбор материала определяет собой модуль упругости и величину допускаемого напряжения на изгиб.

Обычно при расчете спиральных пружин принимается большое значение запаса прочности, так как в рабочем состоянии пружина закручивается на угол φ в несколько раз больший 90°. Так, для фосфористой бронзы принимается $R_{изг}$ порядка 8—10 *кГ/мм²*, а для пружин особенно точных приборов — порядка 4—5 *кГ/мм²*. Конструкция пружины характеризуется отношением $\frac{L}{h}$, которое колеблется в пределах от 1200 до 3000. Меньшие значения $\frac{L}{h}$ принимаются для пружин со значительным моментом, большие — для пружин с малым моментом. Так, для пружин с моментом порядка 10—20 *Гмм* значение $\frac{L}{h}$ бывает порядка 3000.

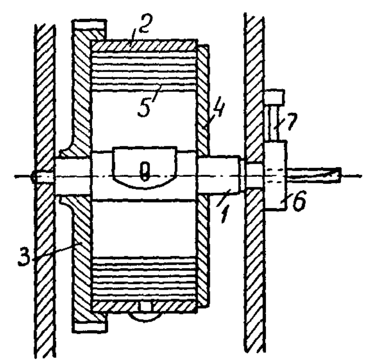
При расчете пружины задаются значением L и определяют величины h и b. Если значение b получается большим, увеличивают значение L.

Конструктивные вопросы. Внутренний конец пружины загибается и закладывается в прорез стержня или оси пружины. Имеется также другая форма крепления конца пружины — посредством штифтов или винтов. Наружный конец пружин крепится к конструкции аппарата посредством хомутиков или пайкой.

е) Заводные спиральные пружины. Заводные спиральные пружины играют роль аккумуляторов энергии и являются приводными механизмами в разных устройствах. Такие пружины закладываются обычно в заводной барабан. Неподвижный наружный конец пружины закрепляется в корпусе барабана, а внутренний



конец — на оси, которой и придается вращающий момент.



Фиг. 22, 23. Барабан с заводной пружиной.

Заводные пружины обычно бывают большой длины, но помещаются в корпусе с относительно малыми габаритами и поэтому должны быть завиты без промежутков между витками.

На фигуре 22, 23 показано примерное устройство барабана. Ось имеет две цапфы, расположенные на стенках корпуса. На оси свободно вращается барабан *2*. Дно барабана *3* исполнено с зубчатым венцом и входит в зацепление с механизмом (механизм на фигуре не показан). В верхней части барабана укрепляется крышка *4*. Внутри барабана находится пружина *5*, закрепленная внутренним концом к оси, а наружным к барабану. На квадратной части оси насажен храповик *6*, удерживаемый собачкой *7*. Завод пружины осуществляется поворотом оси. Для этого на квадратной части оси насаживается рукоятка (при ручном заводе) или ось связывается с приводным вспомогательным электродвигателем. Обратному вращению оси мешают храповик и собачка. Под действием пружины проворачивается барабан, а с ним и зубчатый венец, приводящий во вращение механизм устройства.

Расчет. В заведенном состоянии пружина не занимает всего объема барабана (фиг. 22, 24 *а*). При этом число витков пружины w_2, внутренний радиус r и наружный r_2.

При спуске пружина изменяет число витков от w_2 до w_1, внутренний и наружный радиусы пружины меняются от r до r_1 и от r_2 до R (фиг. 22, 24 *b*). Число оборотов w заводного барабана равно разности числа витков заведенной и спущенной пружины: $w = w_2 - w_1$.

Число витков пружины в обоих случаях можно определить в функции ее геометрических размеров, считая, что в заведенном и спущенном состоянии пружины все витки ее плотно при

легают друг к другу. Считая толщину материала пружины h, имеем

$$w_2 = \frac{r_2 - r}{h} \,(a); \quad w_1 = \frac{R - r_1}{h} \,(b); \quad w = w_2 - w_1 = \frac{r_2 - r - R + r_1}{h} \,(c).$$

При конструировании заводных пружин стремятся получить максимально возможное число оборотов барабана. Это условие достигается при соблюдении определенного соотношения между размерами барабана. Объем материала заводной пружины до и после ее завода не меняется. Поэтому имеет место равенство

$$b\,(\pi R^2 - \pi r_1^2) = b\,(\pi r_2^2 - \pi r^2).$$

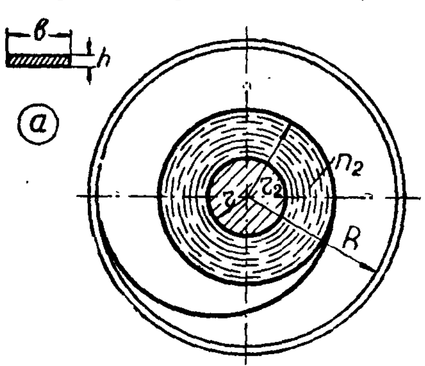
Следовательно,

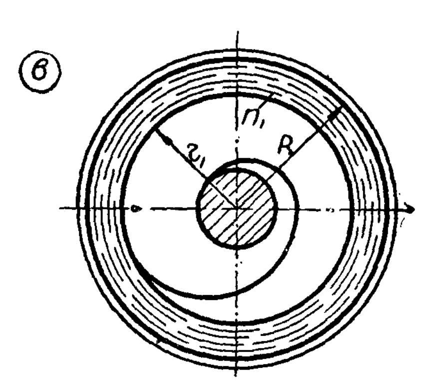
$$r_2 = \sqrt{R^2 - r_1^2 + r^2}.$$

Подставляя значение r_2 в уравнение (c), получаем

$$wh = \sqrt{R^2 - r_1^2 + r^2} - r - R - r_1 \quad (d).$$

Заданными являются геометрические размеры барабана и оси — R, r, а также толщина материала пружины h. При этих заданных величинах число оборотов w является функцией переменного значения r_1. Определим условие получения $w_{макс}$. Для этого берем производную функцию по r_1 и приравниваем ее нулю, учитывая, что $r = пост$; $R = пост$:





Фиг. 22, 24. Спиральная заводная пружина:

а — пружина заведена; *b* — пружина спущена.

$$\frac{dw}{dr_1} = \frac{2r_1}{2\sqrt{R^2 - r_1^2 + r^2}} + 1 = 0.$$

Отсюда

$$r_1 = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}} \quad (e).$$

Подставляя значение r_1 в уравнение (d), имеем

$$r_2 = \sqrt{R^2 + r^2 - \frac{R^2 + r^2}{2}} = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}} \quad (g).$$

Таким образом, условием получения максимального числа оборотов пружины согласно (*e*) и (*g*) является равенство:

$$r_2 = r_1,$$

т. е. внешний радиус заведенной пружины должен быть равен внутреннему радиусу спущенной. Пружина, удовлетворяющая этому условию, называется **нормальной** заводной пружиной.

Расчетные данные 1. Материал пружины — обычно заводные пружины исполняются для получения больших значений моментов и поэтому, как правило, изготовляются из ленточной стали или из стали для часовых пружин. Допускаемое напряжение на изгиб принимается с учетом коэффициента запаса $m = 1{,}5$, т. е. $R_{изг} = 70 \div 120$ *кГ/мм²*.

2. Толщина материала пружины принимается в зависимости от внешнего радиуса пружины и допускаемого напряжения на изгиб. По опытным данным рекомендуется принимать $h = \frac{2R}{R_{изг}}$.

Если $R_{изг} = 70 \div 120$, то $h = \frac{2R}{70} \div \frac{2R}{120}$.

Обычно избегают применения толстых стальных лент, так как при этом пружина работает неплавно и вероятность ее поломки бóльшая, чем при более тонких пружинах. В релестроении применяются пружины с размером в пределах $0{,}3 \div 0{,}6$ *мм*.

3. Значение радиуса оси определяется из соотношения

$$R/r = k.$$

Обычно принимается $k = 3$.

22-4. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И ПРИМЕРЫ

Прямая пружина (фиг. 22, 25 *а*).

$$f = \frac{1}{3}\frac{QL^3}{EJ}; \qquad (22\text{-}1)$$

$$\text{момент } QL = WR_u. \qquad (22\text{-}2)$$

$$J = \frac{bh^3}{12};\ W = \frac{bh^2}{6}.$$

Из (22-1) и (22-2)

$$f = \frac{2}{3}\frac{L^2}{h}\frac{R_u}{E}; \qquad (22\text{-}3)$$

$$Q = \frac{bh^2}{6}\frac{R_u}{L}. \qquad (22\text{-}4)$$

Известны L, Q, f; задаваясь R_u, определяют

$$h = \frac{2L^2R_u}{3Ef}; \qquad (22\text{-}5)$$

$$b = \frac{6QL}{h^2R_u}. \qquad (22\text{-}6)$$

Пример.

$L = 40$; $f = 6$; $Q = 0{,}2$ *кГ*.

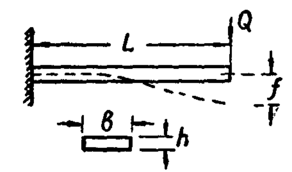
Материал: фосфористая бронза $E = 11 \cdot 10^3 \frac{кГ}{мм^2}$.

$$R_u = 30 \frac{кГ}{мм^2},$$

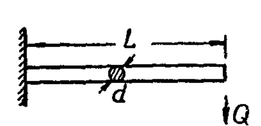
$$h = \frac{2 \cdot 40^2 \cdot 30}{3 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 6} = 0{,}485, \text{ принимаем } h = 0{,}5 \text{ мм},$$

$$b = \frac{6 \cdot 0{,}2 \cdot 40}{0{,}5 \cdot 30} = 6{,}4 \text{ мм}.$$

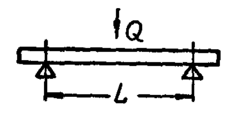
Фиг. 22, 25 (от *a* до *k*). Эскизы к расчету пружин:



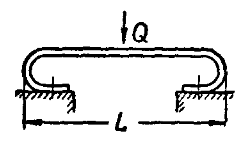
a — прямая;



b — круглого сечения;



c — прямая пружина, нагруженная посредине;



d — натянутая;

Прямая пружина круглого сечения (фиг. 22, 25 *b*)

$$f = \frac{2}{3} \frac{L^2 R_u}{dE}; \tag{22-7}$$

$$Q = \frac{\pi d^3}{32} \frac{R_u}{L} \approx 0{,}1 d^3 \frac{R_u}{L}. \tag{22-8}$$

Прямая пружина, нагруженная посредине (фиг. 22, 25 *c*)

$$f = \frac{1}{6} \frac{L^2}{h} \frac{R_u}{E}; \tag{22-9}$$

$$Q = \frac{2}{3} \frac{bh^2}{L} R_u. \tag{22-10}$$

Натянутая пружина (фиг. 22, 25 *d*)

$$f = \frac{1}{12} \frac{L^2}{h} \frac{R_u}{E}; \tag{22-11}$$

$$Q = \frac{4}{3} \frac{bh^2}{L} R_u. \tag{22-12}$$

Контактная пружина изогнутая (фиг. 22, 25 *е*)

Пример. $f = 1$ *мм*; $Q = 0{,}4$ *кГ*; $L = 16$ *мм*, фосфористая бронза.

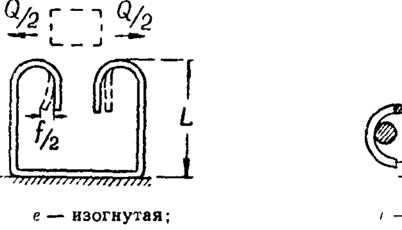
Расчет для половины пружины. $0{,}5Q$; $0{,}5f$.

$$m_0 = 4;\ R_u = 12\,\frac{кГ}{мм^2},$$

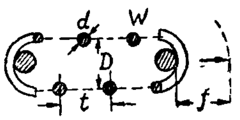
согласно (22-5) и (22-6)

$$h = \frac{2 \cdot 16^2 \cdot 12}{3 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 0{,}5} = 0{,}372 \text{ мм, принимаем } h = 0{,}4 \text{ мм}$$

$$b = \frac{6{\cdot}02 \cdot 16}{0{,}4^2 \cdot 12} = 10 \text{ мм.}$$



е — изогнутая;



f — цилиндрическая растяжения;

Винтовая цилиндрическая пружина растяжения (фиг. 22, 25 *f*)

$$c_1 = \frac{D}{d} = 5 \div 10; \quad f = \frac{8D^3}{d^4}\frac{Q}{G}w. \tag{22-13}$$

$$c_2 = \frac{L}{D} \leqslant 5; \quad Q = \frac{\pi d^3}{8D}R_k. \tag{22-14}$$

Тогда

$$f = \frac{\pi w D^2 R_k}{Gd}. \tag{22-15}$$

Рекомендуемые данные:

D — 5; 6; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40 *мм*;

d — 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2 *мм*.

Из (22-14), задаваясь c_1, получаем

$$d = \sqrt{\frac{8c_1 Q}{\pi R_k}}. \tag{22-16}$$

Из (22-13) вычисляется w_p, оба концевых вптка считают за один рабочий. Свободная длина пружины

$$\text{с шаговой навивкой} \to l_0 = tw_p + 2D \tag{22-17}$$

$$\text{с открытой навивкой} \to l_0 = dw_p + 2D \tag{22-18}$$

Длина проволоки с учетом концевых витков

$$L = \pi D\,(w + 1). \tag{22-19}$$

Жесткость пружины

$$j = \frac{Q}{f} = \frac{Gd^4}{8wD^3}. \tag{22-20}$$

Пример.

$$Q_1 = 0{,}55 \text{ кГ}; \; Q_2 = 0{,}8 \text{ кГ}; \; j = 0{,}05 \text{ кГ/мм}.$$

Материал: рояльная проволока

$$G = 8 \cdot 10^3 \text{ кГ/мм}^2; \; R_k = 80 \text{ кГ/мм}^2.$$

Вариант 1. Шаговая навивка $t = 1{,}5\, d$; $c_1 = 10$.

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot 10 \cdot 0{,}8}{\pi 80}} = 0{,}55; \text{ принимаем } d = 0{,}5 \text{ мм}.$$

$$D = 10 \text{ мм}; \; f = \frac{Q_2}{j} = \frac{0{,}8}{0{,}55} = 16 \text{ мм}; \; f_1 = \frac{Q_1}{j} = 10 \text{ мм};$$

$$f_2 = 16 - 10 = 6 \text{ мм}; \; w_p = \frac{16 \cdot 0{,}5^4 \cdot 8000}{8 \cdot 5^3 \cdot 0{,}8} = 10;$$

$$l_0 = 1{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 10 + 10 = 17{,}5 \text{ мм}.$$

Полная длина пружины в растянутом состоянии

$$l = l_0 + f = 17{,}5 + 16 = 33{,}5 \text{ мм}.$$

Вариант 2. Требуется, чтобы $l \leqslant 30$ *мм*; принимаем закрытую навивку. При $Q_2 = 0{,}8$ *кГ*; $f = l - l_0 = 30 - 17{,}5 = 12{,}5$ *мм*;
$Q_2 - Q_0 = 12{,}5 j = 12{,}5 \cdot 0{,}05 = 0{,}625$ *кГ*.
Предварительное натяжение

$$Q_0 = Q_2 - 0{,}625 = 0{,}175 \text{ кГ}.$$

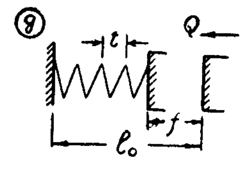
$$\frac{Q_0}{Q_2} = \frac{0{,}175}{0{,}8} = 0{,}218 \text{ — допустимое.}$$

Цилиндрические пружины сжатия (фиг. 22, 25*g*)

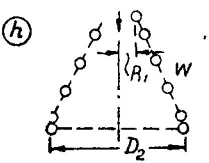
Расчетные соотношения см. выше (пружины растяжения).

$$t = \frac{D}{2} \div \frac{D}{3}; \; w_p = w - 2;$$

$l_0 = t w_p + 1{,}5\, d$ — свободное состояние,
$l = d w_p + 1{,}5\, d$ — полностью сжатая.



g — цилиндрическая сжатия;



h — коническая;

Рекомендуемые данные:

$$w_p \to 2{,}5, \; 3{,}5, \; 4{,}5; \; 6{,}5; \; 8{,}5; \; 11{,}5; \; 15{,}5; \; 18{,}5.$$

Коническая пружина (фиг. 22, 25*h*)

$$f = \frac{\pi w D_2^2 R_k}{4Gd}; \tag{22-21}$$

$$c_1 = \frac{D_2}{d}; \; d = \sqrt{\frac{8Qc_1}{\pi R_k}}; \tag{22-22}$$

$$w = \frac{4dfG}{\pi d_2^2 R_k}. \tag{22-23}$$

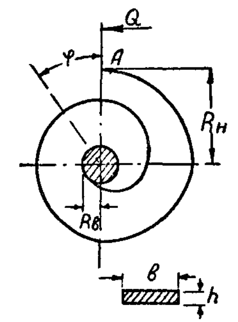
Длина проволоки

$$L = \pi w \left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right). \tag{22-24}$$

Виитовая пружина, работающая на изгнб (фиг. 22,20)

$$Q = W_z \frac{R_u}{a} = \frac{\pi d^3}{32a} R_u. \tag{22-25}$$

$$M = Qa = \frac{J_z E \varphi}{L}. \tag{22-26}$$



i — спиральная, моментная;

Прогиб свободного конца $f = a\varphi$.

$$f = 2\frac{aLR_u}{Ed}; \tag{22-27}$$

$$L = \frac{J_z E\varphi}{Qa} = \frac{\pi d^4}{64}\frac{E\varphi}{Qa}. \tag{22-28}$$

$$w = \frac{L - a - b + D}{\pi D}. \tag{22-29}$$

Пример. Задано: $Q_0 = 0{,}155$ *кГ*; $Q_1 = 0{,}2$ *кГ*; рабочий угол $\varphi_1 = 10° = 0{,}174$ *рад;* $D = 6$ *мм*; $a = 9$ *мм*; $b = 12$ *мм*;

Найти: $w_1 - d_1 - \varphi_0 - L$.

Материал: рояльная проволока $E = 20 \cdot 10^3 \frac{кГ}{мм^2}$;

$$R_u = 30\frac{кГ}{мм^2};\quad \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_0};\quad \varphi = \varphi_0 \frac{Q_1}{Q_1 - Q_0} = 0{,}78\ рад = 45°;$$

$$\varphi_0 = 35°;\ d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 0{,}2 \cdot 9}{\pi 30}} = 0{,}85\ мм;$$

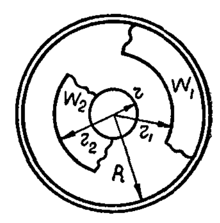
$$L = \frac{\pi \cdot 0{,}85^4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0{,}78}{64 \cdot 0{,}2 \cdot 9} = 223\ мм;\ w = \frac{223 - 9 - 12 + 6}{\pi 6} = 11.$$

Спиральная пружина (фиг. 22, 25 *i*)

$$M = WR_u = \frac{bh^2}{6} R_u; \tag{22-30}$$

$$M = \frac{EJ_z}{L}\varphi; \tag{22-31}$$

$$J_z = \frac{bh^3}{12}.$$



k — спиральная заводная.

L — развернутая длина ленты, *мм*.

$$\varphi = 2\frac{R_u L}{hE}. \tag{22-32}$$

$$h = \frac{2LR_u}{\varphi E}; \tag{22-33}$$

$$b = \frac{6M}{R_u h^2}. \tag{22-34}$$

$$L = \frac{\varphi E h}{2R_u}; \tag{22-35}$$

$$w = \frac{L}{\pi(R_в + R_н)}. \tag{22-36}$$

Расстояние между витками

$$a = \frac{\pi\left(R_н^2 - R_в^2\right)}{L}. \qquad (22\text{-}37)$$

Пример. Момент $M = 12{,}2$ *Гмм* при угле $\frac{\pi}{2}$. Материал — фосфористая бронза $E = 11 \cdot 10^3 \frac{кГ}{мм^2}$.

$$R_и = 3 \frac{кГ}{мм^2}; \text{ задаемся } L = 400 \text{ мм};$$

$$h = \frac{2 \cdot 400 \cdot 3}{0{,}5 \cdot \pi \cdot 11 \cdot 10^3} = 0{,}139; \text{ принимаем } h = 0{,}15 \text{ мм};$$

$$b = \frac{6 \cdot 0{,}012}{0{,}15^2 \cdot 3} \approx 1 \text{ мм}; \ R_н = 11{,}5 \text{ мм}; \ R_в = 2{,}5 \text{ мм};$$

$$w = \frac{L}{\pi(R_н + R_в)} = 9{,}1; \ a = 1 \text{ мм}.$$

Спиральная заводная пружина (фиг. 22,25 *k*)

$$h = \frac{2R}{\sigma}; \ \frac{R}{r} = 3;$$

$$\text{развернутая длина } L = \pi w_1 (R + r_1) + 2\pi r. \qquad (22\text{-}38)$$

$$M = \frac{EJ_z}{L} \varphi; \qquad (22\text{-}39)$$

$$J_z = \frac{bh^3}{12}; \ \varphi = 2\pi w_3.$$

$$w_{3\,макс} = w_2 - w_{св}; \ w_{3\,мин} = w_1 - w_{св};$$

$w_{св}$ на 2—3 витка меньше w_1.

$$M_{макс} = \frac{EJ_z}{L} 2\pi w_{3\,макс}; \ M_{мин} = \frac{EJ_z}{L} 2\pi w_{3\,мин}.$$

Учитывая трение между витками, уменьшают значение M на 20—30%.

ГЛАВА 23

КОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ

Контактной системой называется элемент реле, осуществляющий операции замыкания или размыкания контактов. Контактная система состоит из подвижных частей — контактных рычагов, пружин, и неподвижных — контактных стоек, пружин, а также самих контактов, скрепленных с этими частями.

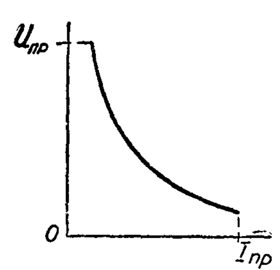
23-1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ

Различают эксплуатационные параметры — разрывную способность P, предельно допустимые значения напряжения $U_{пр}$ ока $I_{пр}$, частоту включений, и конструктивные — ход кон-

тактов x, давление Q. Надежная работа контактной системы при заданных эксплуатационных параметрах зависит от принятых конструктивных параметров, формы и материала контактов.

При проектировании контактной системы следует учитывать не только процесс размыкания, но и процесс включения. При неудачно выполненной конструкции в процессе включения наблюдаются явления отскакивания контактов, вибрации пружин и приваривания контактов.

Разрывная способность контактов определяется условием надежного гашения дуги, возникающей в процессе размыкания контактов. Разрывную способность характеризуют условно



Фиг. 23, 1. Характеристика контактной системы.

$$P = UI,$$

где U — напряжение сети, I — ток в цепи до момента размыкания.

Для контактной системы, обладающей определенной разрывной способностью P, имеет место гиперболическая зависимость $U = f(I)$ (фиг. 23, 1). Гипербола эта имеет ограничения, определяемые значениями: $U_{пр}$ — предельно допустимого для данной контактной системы напряжения сети, $I_{пр}$ — предельно допустимого из условий нагрева контактов значения тока. Значение P в основном зависит от раствора контактов x: гашение дуги происходит в момент, когда дуга растягивается до размеров, при которых приложенное к контактам напряжение становится недостаточным для ее поддержания. Значение x определяется различными факторами: родом тока, индуктивностью нагрузки, напряжением сети.

При разрыве цепи постоянного тока необходимо растянуть дугу до величины, при которой напряжение сети будет меньше напряжения погасания дуги $U_п$. При переменном токе, вследствие погасания дуги при переходе тока через нуль, напряжение сети должно быть меньше напряжения зажигания дуги $U_з$ при определенной ее длине.

Напряжение $U_з$ значительно выше $U_п$. Поэтому для данной контактной системы значение P цепи переменного тока принимается в несколько раз большим, чем для постоянного (см. ниже). Большое значение при разрыве дуги имеет индуктивность нагрузки.

Для цепей постоянного тока индуктивность нагрузки условно оценивают значением $\cos\varphi$, которую экспериментально определяют включением катушки на переменный ток 50 *гц*. По опытным данным, магнитные системы контакторов и реле управления постоянного тока обладают индуктивностью, характеризующейся условно $\cos\varphi = 0{,}1 \div 0{,}15$.

В литературе приводятся эмпирические зависимости $U_д = f(I, l_д)$,

где $l_д$ — длина дуги. Однако в этих зависимостях не учтен ряд факторов, влияющих на разрывную способность контактов. К настоящему времени не проведены также систематические экспериментальные работы, на основании которых можно было бы установить данные для расчета.

Ниже приводятся для иллюстрации опытные данные по отдельным конструкциям контактных систем.

1) Раствор контактов $x = 0,5$ *мм*; размыкание цепи постоянного тока 220 *в*; 15 *вт*; $\cos\varphi = 0,1$.

2) Контакты кодовых реле $x = 0,6 \div 1,2$ *мм*;
материал — серебро;
предельное напряжение $U_{пр} = 220$ *в*;
предельный ток разрыва $I_{пр}$ — 3 *а*;
разрывная способность — постоянный ток — 80 *вт*;
переменный ток — 400 *вт*.

Указанные данные относятся к случаям работы реле с малой частотой. При работе реле с большой частотой рекомендуется уменьшить значение P до 50—70% приведенных данных. Для улучшения работы контактов применяется искрогасительный контур: $C = 0,5$ *мкф*, $r = 5$ *ом*. Значительное улучшение работы контактной системы получается при замене материала контактов: вместо серебра ставят металлокерамические.

3) Контакты реле управления, исполняемые в виде контактных мостов с двумя последовательно включаемыми разрывами. Ход контактов — 3—4 *мм*. Давление в контактах — порядка 100—125 *Г*.

Данные разрывной способности при индуктивной нагрузке.
Постоянный ток: 110 *в* — 2,5 *а*;
220 *в* — 1 *а*;
500 *в* — 0,5 *а*.
Переменный ток: 220 *в* — 20 *а*;
380 *в* — 20 *а*.

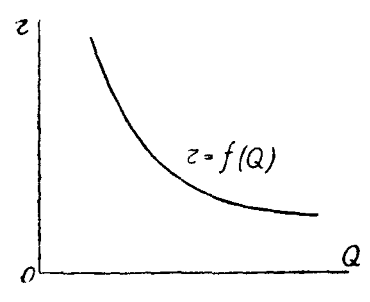
Минимальное значение раствора контактов. При коммутировании контактами реле небольших значений токов — порядка десятых долей ампер — можно принимать небольшие значения раствора контактов. При проектировании быстродействующих и высокочувствительных реле доводят величину x до минимума. Так, в телефонных поляризованных реле значение x принимают порядка (0,05 — 0,1) *мм*. При установлении значения x следует учитывать возможные коммутационные перенапряжения в цепи постоянного тока. При отключении мощных электромагнитов возникающее при этом напряжение $E = -L\frac{di}{dt}$ достигает высоких значений. В таких цепях наблюдаются случаи пробоя контактного промежутка и связанного с этим неправильного срабатывания.

Прочность изоляции каждой электрической установки проверяется испытательным напряжением, в несколько раз большим,

чем рабочее. Ниже приводятся опытные данные для установления $x_{мин}$ в зависимости от величины испытательного напряжения.

U_1, *кв*	0,8	1,2	1,9	2
$x_{мин}$, *мм*	0,125	0,25	0,5	0,6

Давление в контактах. Нагрев контактов зависит от величины джоулевых потерь в переходном сопротивлении r. Допускаемая по ГОСТ предельная температура превышения 70°. Переходное сопротивление r зависит от материала контактов, состояния их поверхности и от давления в контактах. На фигуре 23,2 приведена кривая, показывающая зависимость $r = f(Q)$ для контактов реле завода «Красная заря».



Фиг. 23, 2. Зависимость переходного сопротивления от давления.

В среднем, для контактов, коммутирующих токи порядка до $2 \div 3\,a$, принимается давление $25 \div 30\,Г$. В высокочувствительных реле это давление снижают до $1 \div 2\,Г$, в реле управления с контактами, коммутирующими токи порядка $10\,a$ — повышают до $100 \div 150\,Г$.

При коммутировании токов порядка $1\,a$ и выше необходимо выполнять контактную систему так, чтобы в момент соприкосновения контактов давление получалось определенной величины, а не нарастало от нуля. Определяется это условие необходимостью устранения приваривания контактов, которое может получиться при $Q_н \cong 0$ и большом значении r.

В кодовых реле это условие достигается установкой пружин неподвижных контактов с предварительным напряжением (фиг. 23, 7), в устройствах мостикового типа, пружина n создает на мостике предварительную силу нажатия Q_0 (фиг. 23, 19). Обычно Q_0 принимают равным приблизительно половине конечного давления в контактах.

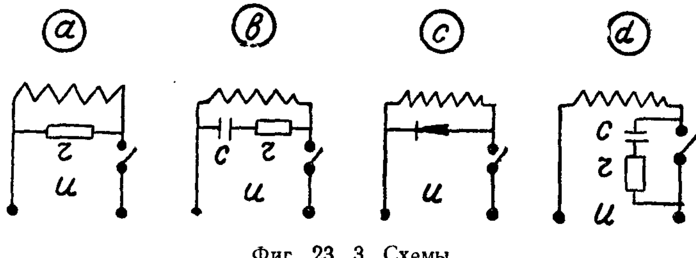
23-2. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ

Дуга, образующаяся на контактах, приводит к их порче, поэтому, в случаях, когда контактам приходится разрывать большие мощности и при большой частоте срабатываний применяют искусственные средства для уменьшения размеров дуги. Применяется два основных метода: шунтирование индуктивности разрываемой цепи или шунтирование контактов. В обоих случаях магнитная энергия индуктивной цепи расходуется в основном не в дуге, а в шунтирующем устройстве.

Шунтирование индуктивности цепи (фиг. 23, 3*a*, *b*, *c*). Такие схемы применяются относительно редко, так как шунтирование

катушки электрическим сопротивлением, емкостью или выпрямителем изменяет время $t_н$ отпуска якоря.

Шунтирование контактов (фиг. 23, 3*d*). Наиболее часто применяется схема с емкостью, последовательно с которой ставится сопротивление *r*; значение *C* принимают порядка 0,5 ÷ 2 *мкф*.



Фиг. 23, 3. Схемы.

Для определения минимального значения *r* пользуются формулой Крюгера

$$r = \frac{U^2}{a},$$

где *U* — напряжение на конденсаторе, *a* — постоянная, зависящая от материала контакта. Для серебра $a = 140$; платины — $a = 180 \div 200$. Для шунтирования контактов кодовых реле применяют обычно: $C = 0{,}5$ *мкф*.

23-3. ВИБРАЦИИ КОНТАКТОВ

При оценке работы контактных систем большое внимание уделяется также процессу замыкания контактов. В процессе замыкания имеет место явление удара, определяемое наличием кинетической энергии подвижных контактных частей. При ударе может получиться отскакивание подвижного контакта с разрывом цепи или вибрация пружин подвижного контакта.

Исследование явлений, происходящих в момент удара в контактной системе, производится осциллографом (см. схему на фиг. 23, 4). Контактами реле замыкают цепь постоянного тока низкого напряжения — порядка 4 *в*. При включении цепи катушки срабатывает реле.

На фигуре 23, 5 показаны примерные осциллограммы тока, протекающего в цепи контактов в момент их включения:

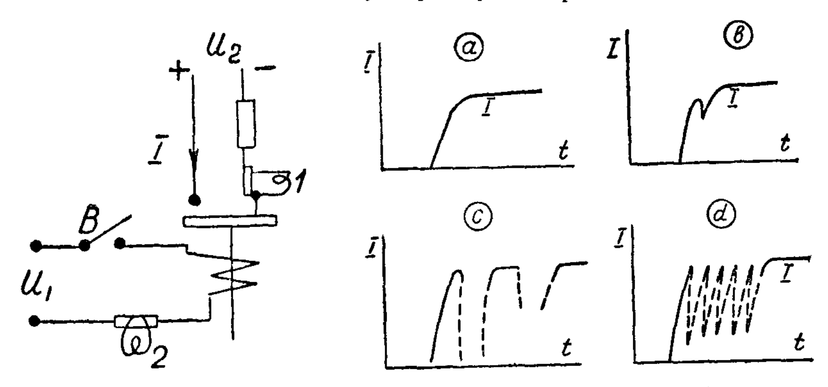
a, *b* — процесс происходит без отскакиваний и ударов;

c — наблюдается явление отскакивания;

d — наблюдается явление вибраций контактной пружины.

Явления отскакивания контактов и вибраций пружин весьма нежелательны, так как приводят к удлинению процесса замыкания цепи, а в ряде случаев к значительному подгоранию контактов.

В литературе приводятся аналитические соотношения для определения условий устранения указанных явлений. Практического применения эти соотношения не получили, так как при выводе этих соотношений не учтены условия работы контактной системы, определяющие в основном возникновение явления отскакивания и вибраций. Поэтому при проектировании контактных



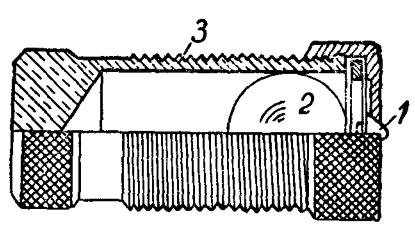
Фиг. 23, 4. Схема для исследования работы контактной системы: *1, 2* — шлейфы; *В* — выключатель.

Фиг. 23, 5. Осциллограммы работы контактной системы в момент включения.

систем пользуются общими практическими соображениями, которые приводятся ниже.

Способы устранения явлений отскакивания и вибраций.

1) Применение успокоителей, в виде демпфирующих устройств, связанных с подвижной частью контактной системы. Такой способ используется в индукционных дисковых реле: в системе устанавливают постоянные магниты, поле которых индуктирует в диске при его вращении вихревые токи. Успокоители не должны применяться в быстродействующих реле, так как при наличии успокоителей уменьшается скорость срабатывания.



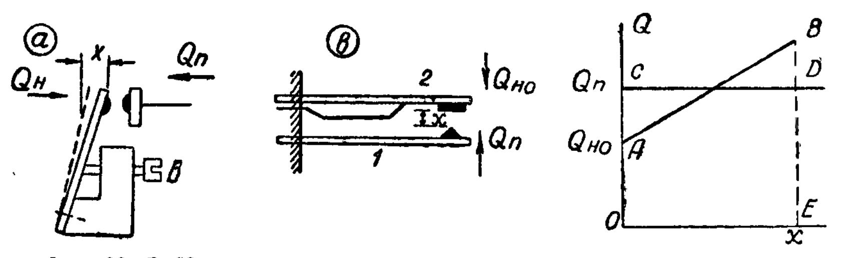
Фиг. 23, 6. Устройство неподвижного контакта.

2) Контактная система исполняется так, что кинетическая энергия подвижной части поглощается неподвижной.

На фигуре 23, 6 приведен пример такого устройства. Неподвижный контакт исполняется в виде полой трубки (*3*), установленной с небольшим уклоном так, чтобы шарик (*2*) располагался всегда у мембраны. При ударе подвижного контакта вся энергия движения передается через гибкие мембраны шарику, который отскакивает с определенной скоростью, а затем медленно возвращается в исходное положение. Размеры шарика подбираются

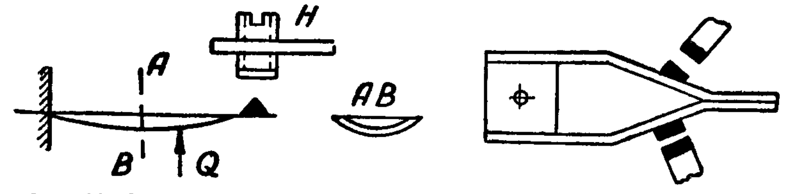
экспериментально. В выполненных быстродействующих индукционных реле лучшее решение получилось при $\varnothing = 9$ *мм*.

3) Неподвижный контакт исполняется в виде пружины с предварительным натяжением (фиг. 23, 7). Диаграмма работы контактной системы приведена на фигуре 23, 8: подвижный контакт подходит с силой Q_n, совместное перемещение обоих контактов x; неподвижный контакт имеет силу $Q_{но}$ предварительного натяжения,



Фиг. 23, 7. Исполнения контактных систем. Фиг. 23, 8. Диаграмма работы.

жесткость пружины характеризуется линией AB. Площадка $ocDE$ соответствует работе $Q_n x$, которая эквивалентна кинетической энергии подвижного контакта. Для поглощения этой энергии на пути x необходимо, чтобы площадка $OABE = ocDE$.



Фиг. 23, 9. Исполнение контактной системы. Фиг. 23, 10. Исполнение контактной системы поляризованных реле.

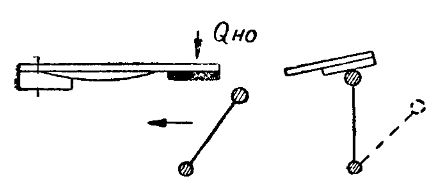
Таким образом, при определенной жесткости пружины неподвижного контакта, требуется наличие предварительного натяжения этой пружины $Q_{но}$. Выполняют контакты так, чтобы можно было регулировать значение $Q_{но}$ винтом (фиг. 23, 7 *a*) или подгибом пружины (фиг. 23, 7 *b*).

4) Неподвижный контакт жесткий, подвижный укреплен на пружине малой жесткости (фиг. 23, 9). Это исполнение встречается в высокочувствительных быстродействующих реле. В таких реле подвижная контактная пружина исполняется толщиной порядка 0,15 *мм*, и в процессе замыкания контактов такая пружина вибрирует. Для устранения вибраций необходимо ожесточить пружину. Рациональное решение получено при выполнении пружины с выдавкой в средней ее части, как это показано на рисунке.

5) Исполнение контактов двухстороннего действия (фиг. 23, 10). Такая конструкция выполняется в поляризованных реле. Две

пружины подвижного контакта заканчиваются в виде плоских площадок, прижимающихся друг к другу. В процессе включения одного из контактов кинетическая энергия системы поглощается работой сил трения в площадках при перемещении одной из них по отношению к другой.

6) Подвижный контакт имеет вращательное движение (фиг. 23, 11). В таком исполнении подвижный контакт с некоторым трением заходит в зону неподвижного. Возникающие в момент замыкания силы удара стремятся отбросить подвижный контакт, но разрыва цепи не происходит, так как напряженный неподвижный контакт перемещается совместно с подвижным.



Фиг. 23, 11. Исполнение контактной системы.

23-4. КОНТАКТЫ

При проектировании контактной системы учитывается материал, форма и размеры контактов.

Материал контактов. Срок службы и надежность работы контактной системы в значительной степени зависят от материала, из которого изготовлен контакт. Материал выбирается в зависимости от принятого давления в контактах, а также от условий работы по частоте включений и разрывной мощности. Большое внимание уделяется износоустойчивости контактов. Разрушение контактов определяется следующими факторами:

Механический износ получается вследствие ударов подвижного контакта о неподвижный; при частой работе контактов и при большом давлении применяют материалы большой твердости и механической прочности — вольфрам, платину, иридий.

Химический износ — коррозия — получается вследствие окисления материала при высоких температурах и отпадания пленки в момент удара. Для уменьшения коррозии контактов применяют платину и ее сплавы.

Электрический износ — эррозия — выражается в переносе металла с одного контакта на другой с образованием бугров, кратеров и мостов между контактами. Минимальный электрический износ получается при материалах с высокой температурой плавления — вольфрам, металлокерамические контакты.

Материалы для контактов должны быть твердыми и механически прочными, устойчивыми против эррозии и коррозии, должны обладать высокой тепло- и электропроводностью, легко обрабатываться. В современной практике применяется большое число материалов, в той или иной степени удовлетворяющих перечисленным требованиям. Наиболее ходкими из них являются: серебро, платина и ее сплавы, вольфрамы и композиции из двух или нескольких металлов. Ниже приводится краткая характеристика перечисленных материалов.

Серебро — наиболее дешевый из применяемых материалов, легко обрабатывается, обладает хорошими свойствами в отношении электро- и теплопроводности. К недостаткам серебра относятся малая твердость, склонность к образованию дуги и, как следствие, недостаточная стойкость в отношении эррозии; серебряные контакты портятся в атмосфере сероводорода, при котором образуется сульфидная пленка, резко повышающая переходное сопротивление контактов. Серебро применяется для контактов с легкими условиями работы и при давлениях порядка 5 *Г* и выше. Не рекомендуется применять серебро в конструкциях, имеющих эбонит, вулканизированную резину, провода с резиновой изоляцией.

Платина — в воздухе не корродирует, обладает повышенной по сравнению с серебром сопротивляемостью эррозии. Из-за недостаточной твердости редко применяется в чистом виде. Область применения — легкие условия работы, при давлениях порядка 1 — 5 *Г*.

Платина-иридий. Этот сплав также не окисляется. Хорошо противостоит дугообразованию, обладает высокой твердостью и поддается, при содержании иридия до 30%, механической обработке. Сплав платина-иридий применяется для маломощных контактов, а также для мощных при большой частоте срабатываний.

Вольфрам весьма тверд, не сваривается и не изнашивается механически, но имеет окисную пленку, вследствие чего требует повышенных давлений в контактах. Обычно чистый вольфрам (99,5 — 99,8%) применяется в конструкциях с повышенными давлениями в контактах (не менее 100 *Г*) при тяжелых условиях работы — большой мощности дуги и частоты срабатываний.

Композиции. В последние годы широкое применение получили композиции, чаще всего двухфазные, например, серебро — молибден, серебро — графит и другие. Для контактов реле чаще всего применяют композицию серебро — окись кадмия (ГОСТ 3884—47), в которой роль токоведущей составляющей играет основная масса — серебро, а роль тугоплавкой — окись кадмия.

Вследствие несплавляемости составляющих композиция изготовляется методами металлокерамики: порошок, смешанный в заданном соотношении, прессуется в стальных прессформах в виде контактов требуемой формы, полученная деталь проходит высокотемпературный нагрев для спекания составляющих, затем калибруется дополнительным обжимом в прессформах и отжигается для снятия наклепа. Область применения композиции серебро — окись кадмия — контактные системы с повышенной разрывной мощностью. Минимальное требуемое давление на контактах — порядка 35—40 *Г*.

В таблице 33 приводятся основные данные наиболее ходких материалов для контактов реле.

Таблица 33

Физические свойства некоторых материалов для контактов реле

Материал	Содержание	Твердость по Бринелю	Температура плавления, °C	Теплопроводность, $\frac{вт}{см\ °C}$	Удельное сопротивление, $ом \cdot см \cdot 10^6$	Удельный вес
Серебро	—	25	961	4,16	1,58	10,5
Платина	—	50	1773	0,7	10,5	21,4
Сплав платина — иридий	Jr 10%	150	1780	0,31	24,5	21,6
	20%	230	1815	0,175	30	21,7
	25%	270	1840		33,5	—
	30%	310	1890		35	21,8
Вольфрам	—	350	3400	1,68	5,32	19,1
Композиция серебро — окись кадмия	ОК—12(CdO—12%)	45			2,5	9,6
	ОК—15(CdO—15%)	55			3	9,4

В практике приняты следующие положения для выбора материала контактов:

1) малые давления — 1—3 *Г* — платина;

2) давления 5—100 *Г*, малая частота срабатываний,— серебро;

3) давление 30—100 *Г*, большая частота срабатываний,— металлокерамические контакты.

4) давление больше 100 *Г*, большая частота срабатывания,— вольфрам.



Фиг. 23, 12. Формы контактов.

Форма контактов. При давлениях до 30—40 *Г* лучшее решение получается при применении плоско-острых пар контактов (фиг. 23, 12): один контакт имеет коническую форму, другой плоскую. При таком исполнении получаются повышенные удельные давления в контактах, а также облегчаются условия сборки, так как устраняется необходимость точной установки контактов по общей осевой линии.

В системах с давлениями больше 30 — 40 *Г* применяют формы контактов: полушар — плоскость, плоскость — плоскость.

Размеры контактов зависят от величины предельно допустимого тока $I_{пр}$ (см. таблицу 34).

Таблица 34

Размеры серебряных контактов

$I_{пр}$, ампер	Диаметр, *мм*	Толщина, *мм*
< 1	до 3	1,0
1—5	» 6	1,5
5—10	» 8	2,0
10—20	» 12	3,0

Размеры металлокерамических контактов (ОК12 и ОК15) (фиг. 23, 17)

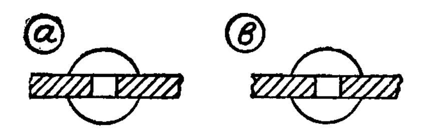
Диаметр, *мм*	5	6	8	10
Длительно-допустимый ток, ампер	10—15	15—25	25—50	50—75

Размеры контактов из сплава: платина — иридий или из вольфрама, $I_{np} = 5$ *а*

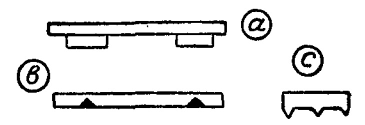
Частота включения	До 8000 в минуту	>8000 в минуту
Диаметр, *мм* .	4	5
Толщина, *мм* .	1,5—2	2

Вопросы технологии. Контакты прикрепляются к другим деталям контактной системы расклепкой, плотной посадкой и приваркой.

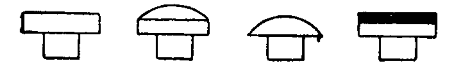
а) При креплении серебряных контактов на контактных пружинах толщиной 0,15 — 0,4 *мм* применяется расклепка (фиг. 23, 13).



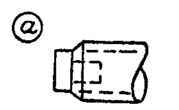
Фиг. 23, 13. Крепленне контактов на пружннах.

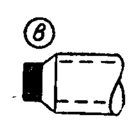


Фиг. 23, 16. Контактный мостик: *a* — с привареиным контактом; *b*, *c* — до приварки.

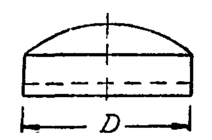


Фиг. 23, 14. Формы заклепок.





Фиг. 23, 15. Крепление контактов на винтах: *a* — вдавливанием; *b* — приваркой.



Фиг. 23, 17. Исполнение металлокерамического контакта ОК12 и ОК15.

б) В ряде случаев контакт выполняется в виде заклепки (фиг. 23, 14) или целиком из материала для контакта, например из серебра, или с основой из латуни с приваркой серебра, платины и других материалов. Заклепка закрепляется в контактном винте или посадкой с натягом, или приваркой в сварочном агрегате (фиг. 23, 15).

в) Прикрепление контактов к подвижным контактным пластинкам (фиг. 23, 16) осуществляется сваркой.

г) Металлокерамические контакты исполняются чаще всего в виде пластинок (фиг. 23, 17) с основанием из латуни. Такая пластинка приваривается серебряным припоем ПСр 45, флюс-бура, нагрев в сварочном агрегате.

23-5. ИСПОЛНЕНИЯ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ

Требования к контактным системам. Для обеспечения надежной работы контактной системы необходимо выполнять следующие основные условия.

1) Должно быть обеспечено определенное давление $Q_к$. Переходное сопротивление в момент соприкосновения контактов должно быть незначительным. Поэтому контактные системы необходимо выполнять так, чтобы в момент соприкосновения контактов имело место начальное давление $Q_н$ определенного значения. Обычно принимают $Q_н = 0{,}4 \div 0{,}5\, Q_к$.

2) Должен быть обеспечен достаточный ход контактов. Хорошее решение получается при исполнении контактов с двойным разрывом (фиг. 23, 19).

3) Замыкание и размыкание контактов должно происходить с большой скоростью. При замыкании контактов не должно иметь место явление отскакивания или вибраций.

4) Температура превышения частей контактной системы не должна быть больше допустимой (70°).

Возврат контактной системы в исходное положение. Различают:

Системы с автовозвратом, когда контакты автоматически возвращаются в исходное положение при возврате подвижной части реле. Такое исполнение принято для основных видов реле.

Системы с ручным возвратом — возврат контактной системы производится от руки. Такое исполнение принято для тепловых реле, для специальных конструкций реле автоматики.

Системы с дистанционным возвратом — возврат осуществляется посредством добавочного электромагнита, включаемого на расстоянии — дистанции.

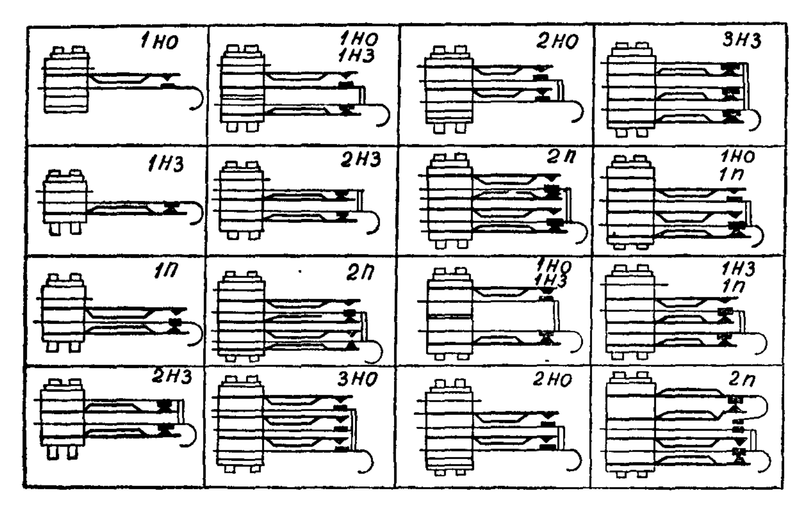
Формы исполнения контактных систем весьма разнообразны и определяются как конструкцией реле, так и условиями монтажа и эксплуатации.

1) *Контактные системы кодовых реле* являются наиболее распространенной формой маломощных электромагнитных реле. Исполняются эти системы в виде отдельных контактных групп из н. о., н. з. и п-контактов (фиг. 23, 18). Каждое реле может быть снабжено несколькими контактными группами (см. фигуру 1, 28, где установлено три контактных группы).

2) *Контактные системы реле управления* исполняются, как правило, с мостиковыми контактами (фиг. 23, 19): рычаг P, связанный с подвижной частью реле, имеет гибкую связь с мостиком — посредством пружины n. Последняя давит с определенной силой $Q_н$ — «встроенное сжатие» — на пластинку при разомкнутом контакте, чем обеспечивается начальное давление в контактах в момент их соприкосновения.

Ход контактного мостика — x_1, ход рычага P должен быть равен $x_1 + x_2$. Последняя величина — x_2 — называется провалом. Величина провала принимается в зависимости от жесткости j

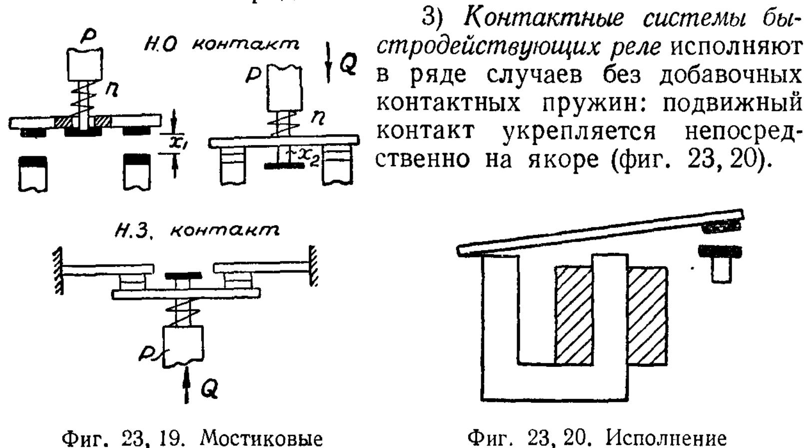
пружины n. Если эта пружина встроена с предварительной деформацией x_3, то конечное давление на контакте $Q_к = j(x_2 + x_3)$.



Фиг. 23, 18. Контактные группы кодовых реле.

Средние данные: $Q_н = 50 \div 75$ *Г*, $Q_к = 100 - 150$ *Г*. Наши заводы выпускают комплектные контактные системы — контактные блоки — состоящие из ряда н. о. и н. з.-контактов.

3) *Контактные системы быстродействующих реле* исполняют в ряде случаев без добавочных контактных пружин: подвижный контакт укрепляется непосредственно на якоре (фиг. 23, 20).

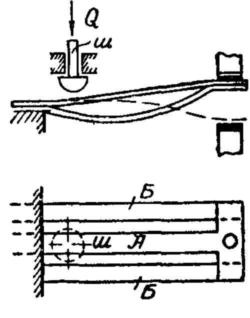


Фиг. 23, 19. Мостиковые контактные системы.

Фиг. 23, 20. Исполнение контактной системы.

4) *Контактные системы индукционных реле* весьма разнообразны. Примерные исполнения приведены на фигурах 23, 7*а*, 23, 11. Примерное исполнение контактной системы поляризованного реле приведено на фигуре 23, 10.

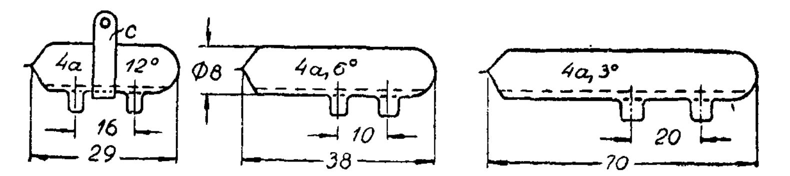
5) *Прыгающие контакты* — особая группа контактов, исполненных так, что при определенном небольшом ходе нажимающего на контакт штифта получается опрокидывание контакта, перемещающегося на большую величину. Такие контактные системы применяются в тех случаях, когда ход невелик 0,1 ÷ 0,2 *мм* и требуется большая величина раствора контактов 3 ÷ 5 *мм*, а также тогда, когда подвижная часть реле перемещается с небольшой скоростью. Следует учитывать, что требуемая сила нажатия на штифт относительно велика — порядка 150 ÷ 200 *Г*.



Фиг. 23, 21. Эскиз прыгающего контакта.

На фигуре 23, 21 приведен эскиз исполнения прыгающего контакта. Средняя часть контактной пружины выполнена так, что она длиннее крайних. Благодаря этому вся пружина изгибается и контакт прижимается кверху. При нажатии на пружину в средней ее части штифтом *ш*, пружина вначале деформируется незначительно, а затем, при увеличении хода штифта, резко опрокидывается (см. пунктир). Имеются исполнения прыгающих контактных систем, встроенных в герметический изоляционный корпус весьма небольших размеров. Такое исполнение называется микровыключателем и выпускается нашими заводами под маркой МП. Применяется в ряде конструкций реле и устройств автоматики.

6) *Ртутные контакты*, в которых замыкание или размыкание цепи осуществляется ртутью, залитой в стеклянную эвакуированную колбу. Колба укрепляется на металлической скобе, связанной



Фиг. 23, 22. Эскизы ртутных контактов, 4 *а*, 220 *в*.

с подвижной частью реле. Требуемый для срабатывания контактов угол наклона колбы принимается порядка 3 — 12° и зависит от размеров колбы (фиг. 23, 22). Ртутные контакты исполняются для сил токов 4, 6, 10, 15, 20, 30 *а*, до 220 вольт, срок службы, определяемый числом включений, достигает 1 — 2 миллионов.

Ртутные контакты обычно применяются в реле и устройства[х] автоматики, устанавливаемых в химических производствах, гд[е] имеется опасность возникновения взрыва от искры или дуги кон[-]тактов открытого исполнения.

23-6. ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При проектировании и расчете реле необходимо строить механические характеристики контактных систем: $Q = f(\delta)$ или $M = \varphi(\theta)$. В обычных исполнениях реле точка приложения сил реакции пружин не совпадает с точкой приложения электромагнитных сил. Поэтому при проведении расчетов данные сил реакции приводят к точке приложения на якоре электромагнитной силы. Ниже приводятся примеры построения характеристик контактных систем с нормально открытым (н. о.), нормально закрытым (н. з.) и переключающимся (п) контактами.

В таблице 35 приведены формулы для расчетов плоских пружин.

Таблица 35

Вычисление сил реакции и деформаций пружины при разных положениях внешней приложенной силы

Внешняя сила приложена в конце пружины	Внешняя сила приложена в средней части пружины
l_2, Q_2, f_2, f_1, l_1, Q_1	l_2, Q_1, f_1, Q_2, f_2, l_1
$f_1 = \frac{Q_1 l_1^3}{3EJ}$	$f_1 = \frac{Q_2 \cdot l_2^2}{EJ}\left(\frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{6}\right)$
$f_2 = \frac{Q_1 \cdot l_2^2}{EJ}\left(\frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{6}\right)$	$f_2 = \frac{Q_2 \cdot l_2^3}{3EJ}$
$K_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{l_2^2}{l_1^2}\left(1{,}5 - 0{,}5\frac{l_2}{l_1}\right)$	$K_2 = \frac{f_1}{f_2} = 1{,}5\frac{l_1}{l_2} - 0{,}5$
$Q_1 = \frac{3EJ \cdot f_1}{l_1^3}$	$Q_1 = Q_2/K_2$
$Q_2 = K_2 Q_1$	$Q_2 = \frac{3EJ f_2}{l_2^3}$

1) Н. о. контакт (фиг. 23, 23).

Заданные величины: пружины — из фосфористой бронзы,

$l_1 = 40$ *мм*; $l_2 = 34$ *мм*; $b_2 = 6$ *мм*;
$b_1 = 6$ *мм*; $h_1 = 0{,}35$ *мм*; $h_2 = 0{,}4$ *мм*.

Ход контактов $f_{21} = 1$ *мм*; начальное давление на якорь у изоляционной планки *3*: $Q_{10} = 10$ *Г*. Конечное давление в контактах — $Q_{21} = 25$ *Г*, начальное нажатие пружины *2*, отнесенное к l_2 — $Q_{20} = 12$ *Г*, конечное значение рабочего зазора у якоря $\delta_3 = 0{,}1$ *мм*, отношение плеч l_3 к l_4 равно $k_3 = 1{,}68$.

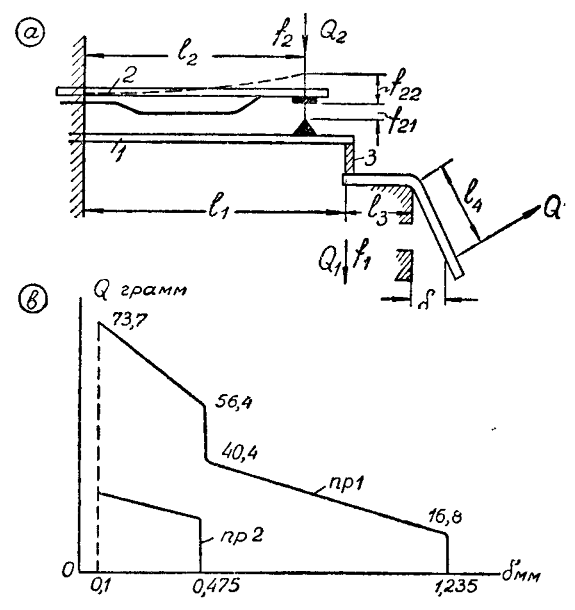
Расчет.

Пружины: $J_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} = 2{,}15 \cdot 10^{-2}$ *мм*⁴; $J_2 = 3{,}2 \cdot 10^{-2}$ *мм*⁴.

$$E = 11 \cdot 10^6 \frac{Г}{мм^2}; \quad j_1 = \frac{3EJ_1}{l_1^3} = 11{,}1 \frac{Г}{мм}; \quad j_2 = \frac{3EJ_2}{l_2^3} = 26{,}4 \frac{Г}{мм}.$$

Коэффициенты (см. таблицу 35):

$$k_1 = \frac{f_2}{f_1} = 0{,}785; \quad k_2 = \frac{f_1}{f_2} = 1{,}26; \quad k_3 = 1{,}68 \text{ (задано).}$$



Фиг. 23, 23. Нормально открытый контакт кодового реле.

Перемещения: пружины (*1*) до замыкания контактов $f_{21} = 1$ *мм*;

$$\text{якоря } \delta_1 = \frac{f_{11}}{k_3} = \frac{f_{21}}{k_1 \cdot k_3} = 0{,}76 \text{ мм.}$$

Дополнительное перемещение пружины *1* до получения давления в контактах, равного 25 *Г*;

$$f_{22} = \frac{Q_{21} - Q_{20}}{j_2} = \frac{25 - 12}{26{,}4} = 0{,}493.$$

$$\delta_2 = \frac{f_{22}}{k_1 k_3} = 0{,}375 \text{ мм.}$$

Силы на якоре: Начальное значение $Q_0 = Q_{10} \cdot k_3 = 10 \cdot 1{,}68 = 16{,}8$ *Г*, при перемещении пружины *1* до момента замыкания контактов — f_{11} (при ходе контактов f_{21})

$$Q_1 = Q_0 + Q_{11} k_3 = Q_0 + f_{11} j_1 k_3 = 16{,}8 + \frac{f_{21} j_1 k_3}{k_1} = 40{,}4 \ Г.$$

При замыкании контактов добавляется сила предварительного нажатия пружины 2

$$Q_1' = Q_1 + \frac{Q_{20}}{k_2} k_3 = 40,4 + \frac{12 \cdot 1,68}{1,26} = 56,4\ Г.$$

Сила на якоре в конечном — притянутом — положении

$$Q_2 = Q_1' + \frac{f_{22} j_2}{k_2} k_3 = 73,7\ Г.$$

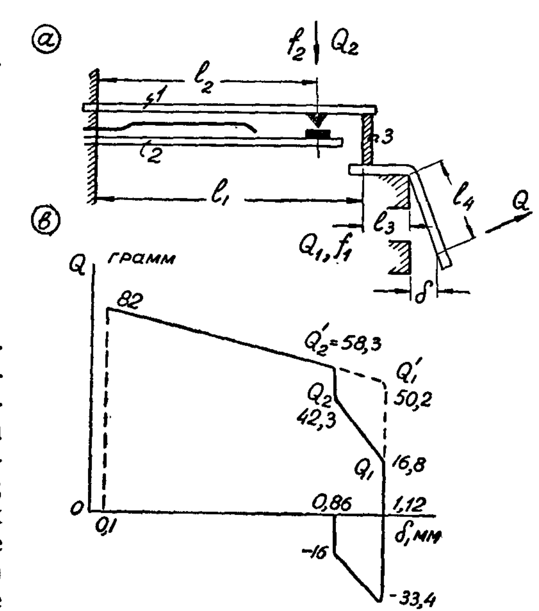
Диаграмма сил, отнесенных к якорю, приведена на фигуре 23, 23 *b*.

2) **Н. з. контакт** (фиг. 23, 24).

З а д а н н ы е в е л и ч и н ы: пружины — фосфористая бронза;

$l_1 = 40$ *мм*;
$l_2 = 34$ *мм*;
$b_1 = 6$ *мм*;
$b_2 = 6$ *мм*;
$h_1 = 0,35$ *мм*;
$h_2 = 0,4$ *мм*.

Ход контактов — разомкнутом их состоянии — $f_2 = 1$ *мм*; начальное давление на якорь — у изоляционной планки *3* — 10 *Г*; нажатие в контактах $Q_{21} = 25$ *Г*, начальное нажатие пружины (2) $Q_{20} = 12$ *Г*; конечное значение рабочего зазора $\delta_3 = 0,1$ *мм*.



Фиг. 23, 24. Нормально закрытый контакт кодового реле.

Расчет.

П р у ж и н ы: $J_1 = 2,15 \cdot 10^{-2}$ *мм*^{4}; $J_2 = 4,55 \cdot 10^{-2}$ *мм*^{4}; $E = 11 \cdot 10^6\ \frac{Г}{мм^2}$;

$$j_1 = 11,1\ \frac{Г}{мм};\quad j_2 = \frac{3EJ_2}{l_2^3} = 38,3\ \frac{Г}{мм}.$$

К о э ф ф и ц и е н т ы (см. таблицу):

$$k_1 = \frac{j_2}{j_1} = 0,785;\quad k_2 = \frac{j_1}{j_2} = 1,26;\quad k_3 = 1,68\ \text{(задано)}.$$

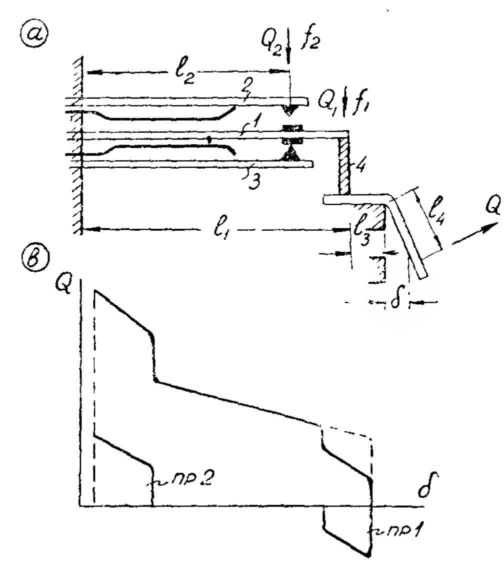
П е р е м е щ е н и я: пружины *1* до момента размыкания контактов определяются деформацией пружины *2* под действием силы Q_{21}; при этом надо учесть начальное нажатие на упор пружины *2* — Q_{20}:

$$f_{21} = \frac{Q_{21} - Q_{20}}{j_2} = \frac{25 - 12}{38,3} = 0,34.$$

Изоляционной планки 3: $f_{11} = \frac{f_{21}}{k_1} = 0,434$; якоря $\delta_1 = \frac{f_{11}}{k_3} = 0,26$.

Ход контактов: $f_2 = 1$ *мм* (задано); $\delta_2 = \frac{f_2}{k_1 \cdot k_3} = 0,76$; полный ход якоря $\delta = \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 = 0,1 + 0,26 + 0,76 = 1,12$.

Силы. Пружина *1* изогнута так, чтобы создавались силы: на якоре у планки *3* $Q_{11} = 10$ *Г*; на контактах $Q_{21} = 25$ *Г*.



Фиг. 23, 25. Переключающийся контакт кодового реле.

Полное значение этой силы, отнесенное к якорю у рабочего зазора:

$$Q_1' = \left(\frac{Q_{21}}{k_2} + Q_{11}\right) k_3 = 50,2\,Г.$$

Учитывая реакцию пружины *2*, получаем результирующую силу на якоре

$$Q_1 = Q_1' - \frac{Q_{21}}{k_2} k_3 = $$

$$= 50,2 - \frac{25}{1,26}\, 1,68 = 16,8\,Г.$$

При перемещении контактных пружин значение силы реакции пружины *2* падает и полностью снимается в момент расхождения контактных пружин (перемещение f_{21}).

На диаграмме, приведенной на фигуре 23, 24, значения сил реакции пружины *2* показаны как обратные силам пружины *1*. Сила реакции пружины *2* при перемещении f_{21}, отнесенная к якорю, равна

$$\frac{Q_{20} k_3}{k_2} = 16\ Г.$$

Сила на якоре при перемещении f_{21}, чему соответствует перемещение δ_2, без учета реакции пружины (*2*)

$$Q_2' = Q_1' + j_1 \frac{f_{21}}{k_1} k_3 = 50,2 + 11,1\, \frac{0,34}{0,785}\, 1,68 = 58,3\ Г;$$

$$Q_2 = Q_2' - 16 = 42,3\ Г.$$

Конечное значение силы на якоре

$$Q_3 = Q_1' + j\, \frac{f_2 + f_{21}}{k_1} k_3 = 50,2 + 11,1\, \frac{1,27 + 0,34}{0,785}\, 1,68 = 82\ Г.$$

Диаграмма сил, отнесенных к якорю в средней точке против рабочего полюса, приведена на фигуре 23, 23.

3) **П-контакт** (фиг. 23, 25). Расчеты для построения диаграммы $Q = f(\delta)$ проводятся по аналогии с расчетами для других видов контактов.

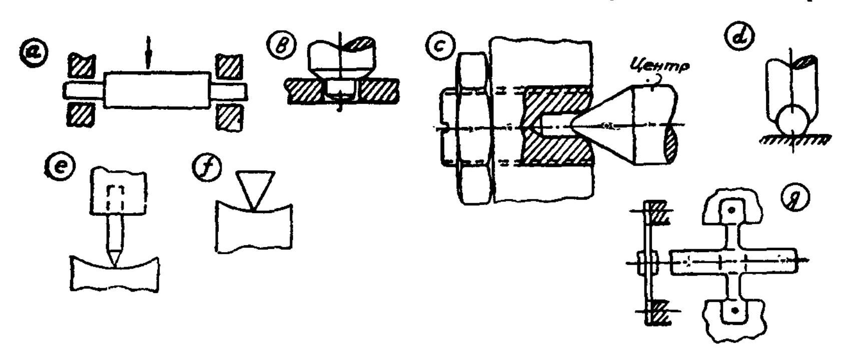
Построение контактных систем, приведенное на фигурах 23, 23, 23, 24 и 23, 25, характерно и для других исполнений.

ГЛАВА 24

НАПРАВЛЯЮЩИЕ ДЛЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

24-1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Подвижные части реле — якорь, диск, рамка — имеют вращательное движение с ограниченным углом поворота. В некоторых



Фиг. 24, 1. Виды опор реле:
a, *b* — цилиндрическая; *c* — на центрах; *d* — шаровая; *e* — на кернах; *f* — на призме; *g* — растяжка.

видах реле и регуляторов имеются детали, совершающие непрерывное вращательное движение, например зубчатые колеса механизмов, диски демпфирующих элементов и другие. Направляющие для вращательного движения — опоры — деталей реле имеют различные формы исполнений.

Выбор той или иной конструкции опоры определяется условиями конструкции: расположением оси, величиной нагрузки на опору, требуемой точностью направления, моментом трения, стойкостью против износа рабочих поверхностей, стойкостью при вибрациях и ударах, стоимостью изготовления и сборки.

В зависимости от вида трения между основными деталями опоры различают:

1) опоры с трением скольжения —цилиндрическая, на центрах, шаровая, на кернах (фиг. 24,1);

2) опоры с трением качения — на призме, шарикоподшипниковая;

3) опоры с трением упругости — на растяжках.

Общие положения по выбору вида опор

Цилиндрические опоры имеют по сравнению с другими большой момент трения, невысокую точность направления и центрирования, износ опор в процессе работы относительно невелик. Цилиндрические опоры применяются в основном при больших нагрузках на опору и значительных моментах вращения.

Опоры на центрах обладают относительно малым моментом трения, высокой точностью центрирования, допускают регулировку оси в пространстве за счет перемещения одного из подшипников. Малая поверхность соприкосновения деталей обусловливает применение таких опор только для небольших нагрузок и очень малых скоростей вращения. Точность центрирования при особо тщательном исполнении достигает 1—2 μ.

Шаровые опоры обладают относительно малым моментом трения. Широко применяются в ряде конструкций реле с вертикальной осью вращения.

Опоры на шпиле имеют весьма малый момент трения. Точность центрирования невелика. Широко применяются в ряде конструкций реле с малой нагрузкой на опору.

Опоры на призме обладают весьма малым моментом трения, износостойкостью при большом числе срабатываний. Широко применяются в электромагнитных реле постоянного тока, где требуются опоры, выдерживающие десятки миллионов срабатываний реле.

Шарикоподшипниковые опоры. До последнего времени шариковые подшипники не применялись в релестроении, что объясняется относительно большими габаритами стандартных подшипников. В настоящее время имеются малогабаритные шариковые подшипники с внутренним диаметром 0,8 *мм* и менее. Такие подшипники обладают очень малым моментом трения, способностью восприятия больших нагрузок, высокой точностью направления и центрирования, устойчивостью при вибрационных нагрузках. Следует поэтому ожидать внедрения этих подшипников в релестроении. Относительно высокая стоимость шарикоподшипников окупится улучшением качества реле и увеличением срока его службы.

Опоры на растяжках представляют собой металлическую ленту, на которой закреплен якорь реле. Применяются при малых углах поворота якоря, например в поляризованных реле.

Смазка опор. Как правило, в опорах конструкций реле не предусматривается смазка.

24-2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПОР

Цапфы опор и керны исполняют из сталей ОВС, У8А, У10а закаленных до твердости $R_c = 50 \div 55$, из сталей СТ35 и других Буксы делают чаще всего из латуни Л59, в отдельных случая из оловянистой бронзы.

В ряде случаев для уменьшения момента трения выполняю конструкции опор с большими значениями удельных давлени

В таких конструкциях подшипники изготовляют из камней — синтетического агата, сапфира и корунда. Конструкции подшипников из агата и корунда приведены на фигуре 24, 11.

Данные для расчетов опор приведены в таблице 36.

Таблица 36

Коэффициенты трения для разных материалов

Материалы	Сталь конструкционная	Сталь инструмент. закаленная
Латунь Л59	0,19	0,14
Бронза оловянистая	0,16	0,15
Дюралюминий	0,19	0,17
Агат	—	0,13
Рубин	—	0,14
Сапфир	—	0,15

Таблица 37

Физические свойства материалов

Материалы	Твердость по МООСУ	Модуль упругости
Бронза	3	$1 \cdot 10^6$
Сталь инструментальн.	6—7	$2 \cdot 10^6$
Латунь	—	$0,95 \cdot 10^6$
Агат	6,5	$1 \cdot 10^6$
Корунд	9	—
Сапфир	9	$5 \cdot 10^6$
Рубин	9	—

Таблица 38

Допустимые значения удельных давлений, *кГ/см²*

Сталь по стали	$p = 130 \div 200$
Каленая сталь по бронзе	$p = 90 \div 150$
Сталь по бронзе	$p = 60 \div 90$
Сталь каленая по сапфиру	$p = 3000$

24-3. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

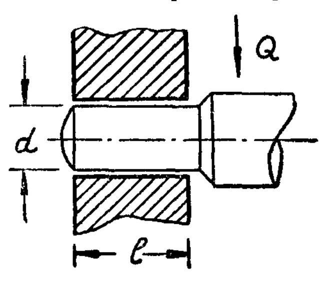
Размеры деталей опор определяются, как правило, по конструктивным соображениям, расчет на прочность производится только в тех конструкциях, где действуют значительные силы и моменты. Особое внимание уделяют при конструировании высокочувствительных и быстродействующих реле вопросу уменьшения моментов трения.

Цилиндрическая опора. Расчет цапф на механическую прочность производится по формулам, принятым для расчета деталей общего машиностроения. При диаметре цапфы меньше 1 *мм* расчет на механическую прочность не выполняется.

Удельное давление на цапфу при равномерном прилегании цапфы к вкладышу (фиг. 24, 2)

$$p = \frac{Q}{d.l}. \qquad (24\text{-}1)$$

Учитывая неравномерное прилегание цапфы, считают



Фиг. 24, 2. Цилиндрическая опора.

$$p = \frac{4}{\pi}\,\frac{Q}{dl}. \qquad (24\text{-}2)$$

Уравнение прочности цапфы на изгиб

$$\frac{Ql}{2} = \frac{\pi d^3}{32} R_{изг}. \qquad (24\text{-}3)$$

При расчете цапфы вводится коэффициент $k = \frac{l}{d}$, называемый конструктивным параметром.

Из (24-2) и (24-3)

$$k = 0{,}5\sqrt{\frac{R_{изг}}{p}}. \qquad (24\text{-}4)$$

Из (24-4) и (24-3)

$$d = 2{,}27\sqrt{\frac{Qk}{R_{изг}}}. \qquad (24\text{-}5)$$

Ход расчета. Задаваясь значениями p и $R_{изг}$ вычисляют k, далее определяют d, а затем l. В высокочувствительных реле принимают

$$p = 15 \div 25\ кГ/см^2.$$

Момент трения цилиндрической опоры

$$M = \frac{Qd}{2}\mu. \qquad (24\text{-}6)$$

Плоская пята (фиг. 24, 3). Конец цапфы и опорная поверхность выполняются в виде плоскостей. Удельное давление в пяте

$$p = \frac{Q}{\pi R^2}; \qquad (24\text{-}7)$$

$$d(M_{тр}) = p\,dqr\mu = 2\pi p\mu r^2 dr.$$

$$M_{тр} = 2\pi p\mu \int_0^R r^2\,dr = \frac{2}{3}\pi\mu p R^3. \qquad (24\text{-}8)$$

Фиг. 24, 3. Плоская пята.

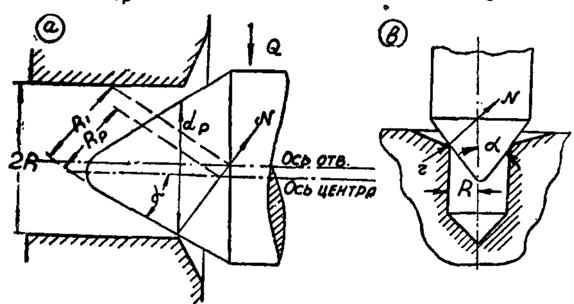
Из (24-6) и (24-8)

$$M_{тр} = 0{,}376\frac{Q^{3/2}}{\sqrt{p}}\mu. \qquad (24\text{-}9)$$

Опоры на центрах.

1) Горизонтальная ось (фиг. 24, 4а). Место соприкосновения центра с подшипником рассматривается как сопряжение

двух тел, сжимаемых силой N. Форма этих тел определяется главной кривизной в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: для центра $\frac{1}{R_p}$ и 0; для подшипника — $\frac{1}{R_1}$ и $\frac{1}{r}$; максималь-



Фиг. 24, 4. Эскизы к расчету опоры на центрах.

ное напряжение в центре площадки соприкосновения определяется по формуле Герца:

$$\sigma_{макс} = n_0 \sqrt[3]{\frac{QE^2}{\rho^2}}, \tag{24-10}$$

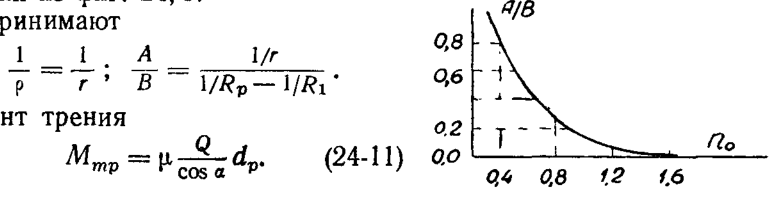
где $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$; E_1 и E_2 — модули упругости подшипника и центра; $\frac{1}{\rho}$ — приведенная кривизна; n_0 — коэффициент, определяемый из фиг. 24, 5.

Принимают

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r}; \quad \frac{A}{B} = \frac{1/r}{1/R_p - 1/R_1}.$$

Момент трения

$$M_{тр} = \mu \frac{Q}{\cos\alpha} d_p. \tag{24-11}$$



Фиг. 24, 5. Кривая для определения n_0.

2) Вертикальная ось (фиг. 24, 4 b). Напряжение на площадке соприкосновения

$$\sigma_{макс} = 0,59 \sqrt{\frac{Q}{2\pi R \sin\alpha \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) r}}. \tag{24-12}$$

Момент трения

$$M_{тр} = \mu \frac{Q}{\sin\alpha} R. \tag{24-13}$$

3) Опоры на кернах.

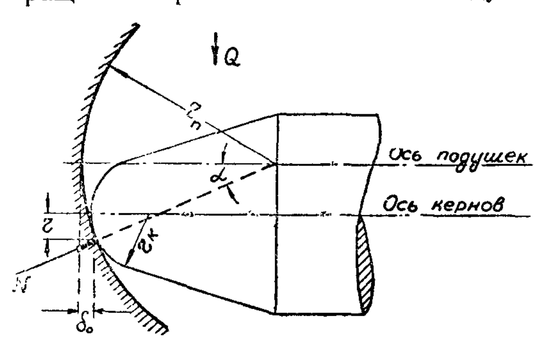
Горизонтальная ось (фиг. 24,6). Обычно длина керна несколько меньше расстояния по оси между подушками. Разность между этим расстоянием и длиной керна — осевой зазор — принимается в среднем

$$\Delta l = 0,6\,(r_n - r_к). \tag{24-14}$$

Величина максимального напряжения на площадке соприкосновения керна и подушки определяется по формуле Герца:

$$\sigma_{макс} = 0{,}617 \sqrt[3]{\frac{Q\left(\frac{1}{r_k} - \frac{1}{r_n}\right)^2}{\left(\frac{1}{E_n} + \frac{1}{E_к}\right)^2}}. \qquad (24\text{-}15)$$

Момент трения определяется из следующих условий: в процессе вращения керн вскатывается по подушке с трением, радиус которого r. Момент трения $M_{тр} = Nr\mu$. Учитывая



Фиг. 24, 6. Эскиз к расчету опоры на кернах.

$$\frac{r}{r_к} = \sin\alpha; \; N = \frac{Q}{\sin\alpha},$$

получаем

$$M_{тр} = Qr_к\mu. \qquad (24\text{-}16)$$

Таким образом, момент силы трения определяется только радиусом керна и не зависит от радиуса подушки и величины осевого зазора. Отношение $\frac{r_к}{r_п}$ принимают порядка $\frac{1}{4} \div \frac{1}{10}$, в среднем $\frac{1}{7}$.

В е р т и к а л ь н а я   о с ь. При вертикальном расположении оси соприкосновение керна и подушки происходит не в одной точке, а по некоторой плоскости радиусом r, что объясняется деформацией керна под действием осевой составляющей силы — веса подвижной системы. По теории Герца значение r зависит от веса подвижной системы, радиусов $r_к$ и $r_п$, а также от модулей упругости материалов керна и подушки:

$$r = \sqrt[3]{0{,}682 \frac{\frac{1}{E_к} + \frac{1}{E_п}}{\frac{1}{r_к} + \frac{1}{r_п}} Q}. \qquad (24\text{-}17)$$

Удельное давление получается равным

$$p = \sqrt[3]{0{,}235 \frac{\left(\frac{1}{r_к} - \frac{1}{r_п}\right)^2}{\left(\frac{1}{E_к} + \frac{1}{E_п}\right)^2} Q} \; кГ/см^2. \qquad (24\text{-}18)$$

Момент трения определяется по формуле (24-9), выведенной для плоской пяты. Уменьшение момента трения керна по сравне-

нию с таковым для плоской пяты достигается за счет повышения удельного давления. Поэтому в опорах на кернах последний изготовляется из специальных сортов стали и закаляется, а подушка — из твердых пород камней — сапфира, рубина или корунда. Конус керна исполняют с углом у вершины от 60 до 90°, значение радиуса керна принимают в функции нагрузки.

Q грамм	$r_к$, микрон
1	5—10
1—2	15—30
2—5	30—40
3—6	40—60
6—200	60—200

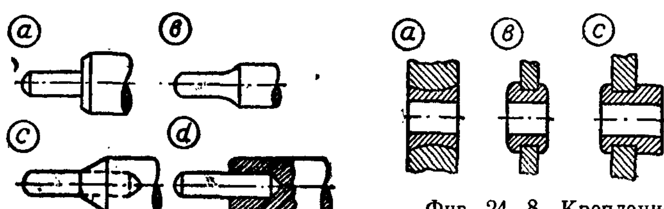
Опоры на призме. Напряжения в месте соприкосновения ножа и подушки определяются по формуле Герца:

$$\sigma_{макс} = 0{,}59 \sqrt{\frac{Q}{l} \frac{1}{r} \frac{1}{1/E_n + 1/E_к}}, \qquad (24\text{-}19)$$

где Q — нагрузка на опору, l — длина площадки соприкосновения, r — радиус закругления ножа.

24-4. КОНСТРУКТИВНЫЕ ВОПРОСЫ

Цилиндрические опоры. В простейшем случае ось исполняется из сплошного материала без специальной обточки цапф. Цапфы диаметром больше 0,5 *мм* обычно представляют собой одно целое



Фиг. 24, 7. Конструкция цапф.

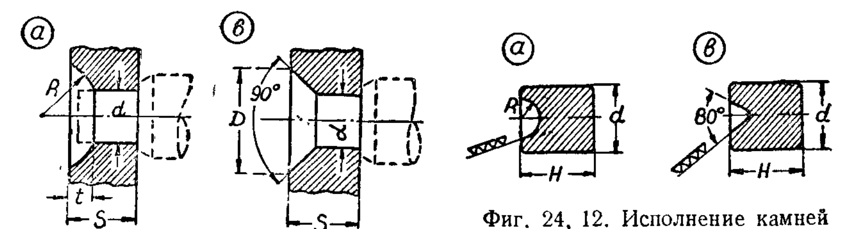
Фиг. 24, 8. Крепление букс: *a* — в толстой плате; *b*, *c* — в тонких; *d* — в фарфоре.

с осью (фиг. 24, 7). При малом диаметре цапфы ось выполняется составной: вставную цапфу из рояльной проволоки, а при больших диаметрах, больше 1 *мм*, из стали серебрянки, впрессовывают в стальную или алюминиевую ось. Способы крепления букс и конструкции подшипников приведены на фигурах 24, 8 и 24, 9.

Опоры на центрах. Основные рекомендуемые размеры приведены на фигуре 24, 10.

Опоры на кернах. Исполнение подшипниковых винтов простейшей конструкции приведено на фигуре 24, 11: *a* — без камня, *b* — с камнем. В более сложных конструкциях подшипников камни укрепляются на пружинном основании. Формы исполнения камней

приведены на фигуре 24, 12. Ввиду недостаточной центрировки опор на кернах ответственные конструкции выполняют при вертикальной оси: верхнюю опору на цапфе, нижнюю — на керне.

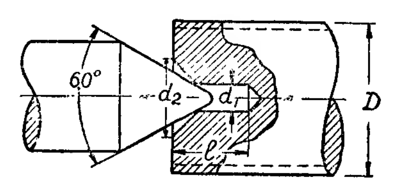


Фиг. 24, 9. Конструкция подшипников:

$a - d < 5$ *мм*; $t = \frac{S}{3}$; $R \cong d$;

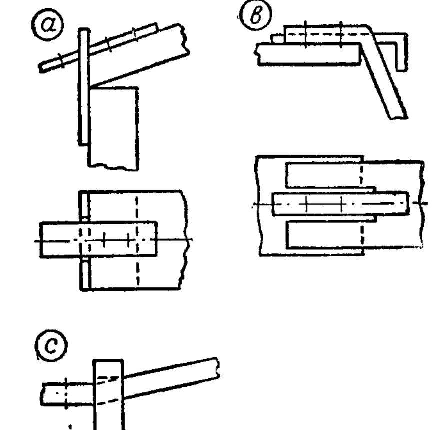
$b - d > 5$ *мм*; $D = 0,8\ (S + d)$.

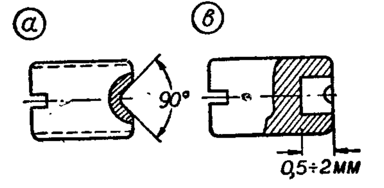
Фиг. 24, 12. Исполнение камней $H = 1 \div 4,5$; $d = 2,3 \div 4,5$.



Фиг. 24, 10. Опора на центрах:

D	До 2,5	2,5—5	5—10	10—2a
d_1	0,5	0,75	1,0	1,5
d_2	1,2	2	2,5	4
l	1,5	2,5	3	4,5





Фиг. 24, 11. Исполнение подшипниковых винтов.

Фиг. 24, 13. Формы исполнения якорей реле — опора на призме.

Опоры на призме. На фигуре 24, 13 приведены примерные исполнения опор для электромагнитных реле постоянного тока.

Обработка. Цапфы, центры, керны и буксы должны быть тщательно отполированы. Чистота поверхности при обработке должна быть обеспечена для опор в центрах, кернах и на призме в пределах 9—10 класса.

ЛИТЕРАТУРА

К части первой «Магнитные системы»

1. Бабиков М. А. Основы электроаппаратостроения, М., Госэнергоиздат, 1950.

2. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью, М., Госэнергоиздат, 1948.

3. Буйлов А. Я. Основы электроаппаратостроения, М., Госэнергоиздат, 1946.

4. Буль Б. К. Методы учета магнитных цепей с учетом магнитного сопротивления стали, ж. «Электричество», 1952 г., № 11.

5. Буль Б. К. К расчету магнитных проводимостей поля, ж. «Электричество», 1952 г., № 7.

6. Буль Б. К. Метод расчета катушки со сталью на переменном токе, ж. «Электричество», 1954 г., № 8.

7. Гальперин Н. А. Специальные характеристики холоднокатанной стали, ж. «Вестник электропромышленности», 1951 г., № 2.

8. Довгалевский Я. М. Сплавы для постоянных магнитов, М., Металлургиздат, 1954.

9. Займовский Я. С. и Усов В. В. Металлы и сплавы в электротехнике, М., Госэнергоиздат, 1949.

10. Кобленц М. Г. Определение перегрева катушек контакторов постоянного тока, ж. «Вестник электропромышленности», 1947 г., № 7.

11. Сенкевич А. М. Постоянные магниты, изд-во ВВА им. Жуковского, 1949.

12. Сотсков Б. С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры, М., Госэнергоиздат, 1950.

13. Справочник по изоляции, М., Госэнергоиздат, 1946.

14. Шрамков А. Я. Прибор для определения короткозамкнутых витков. Научные записки ЛПИ, вып. VIII, 1950.

К части второй «Электромагнитные системы и реле»

1. Витенберг М. Н. Расчет и конструкция телефонных и кодовых реле, М., Госэнергоиздат, 1947.

2. Котов П. А. К теории поляризованных реле, Научно-технический сборник по электросвязи, вып. 4/20, 5/21, 1937.

3. Лысов Н. Е. Расчет электромагнитных механизмов, М., Оборонгиз, 1949.

4. Москвитин А. И. К расчету динамических характеристик, «Известия АН СССР», Отдел технических наук, 1948 г., № 4.

5. Остроумов Г. А. К вопросу о линейной теории поляризованных реле, ж. «Автоматика и телемеханика», 1948 г., № 5.

6. Ротерс. Электромагнитные механизмы, М., Госэнергоиздат, 1949.

7. Сахаров П. В. и Пеккер П. И. Сравнение магнитных систем контакторов переменного тока, ж. «Вестник электропромышленности», 1949 г., № 4.

8. Сахаров П. В. и Пеккер П. И. Упрощенный метод расчета пря-

моходовых систем переменного тока, ж. «Вестник электропромышленности», 1949 г., № 12.

9. Сотсков Б. С., Декабрун И. Е. и Путилова Н. А. Зависимость времени движения подвижной системы от параметров реле, ж. «Автоматика и телемеханика», 1951 г., № 4.

10. Ступель Ф. А. Реле защиты и автоматики, М., Госэнергоиздат, 1949.

11. Ступель Ф. А. Расчет и конструкция электромагнитных реле, М., Госэнергоиздат, 1950.

12. Ступель Ф. А. Вопросы проектирования поляризованных реле для электросиловой автоматики, ж. «Электричество», 1954 г., № 7.

К части третьей «Индукционные системы и реле»

1. Атабеков Г. И. Релейная защита электрических систем, М., Госэнергоиздат, 1952.

2. Бресслер А. М. Омметры дистанционной защиты, Технический бюллетень завода МЭП, Чебоксары, 1950, октябрь.

3. Буль Б. К. Расчет вращающего момента индукционного реле, ж. «Электричество», 1946 г., № 4.

4. Буль Б. К. Теория индукционной системы с экраном, ж. «Электричество», 1947 г., № 7.

5. Гельбух Л. А. Расчет электромеханических моментов индукционного реле с цилиндрическим ротором, ж. «Автоматика и телемеханика», 1949 г., № 1.

6. Ступель Ф. А. R — X характеристики дистанционных реле, Сборник ХЭТИ, М., Госэнергоиздат, 1946.

7. Ступель Ф. А. Расчет индукционных систем и реле. Учебное пособие, ХПИ, 1953.

К части четвертой «Разные реле, элементы конструкций»

1. Алексеевский В. А. Применение термобиметалла в электроаппаратостроении, АН Армянской ССР, 1953.

2. Алексеевский В. В. Новая серия тепловых реле, ж. «Вестник электропромышленности», 1949, № 11.

3. Воробьев А. Н. и Кацнельсон О. Г. Термобиметалл и его применение. М. Госэнергоиздат, 1951.

4. Дроздов Ф. В. Детали приборов. М. Оборонгиз, 1948.

5. Миллер А. Е. и Габриелян Д. И. Термобиметаллы, ж. «Цветные металлы», 1947, № 1 и 2.

6. Сивоконенко И. М. Опоры подвижных систем приборов. Гос. изд-во судостроительной литературы, 1952 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 4. Расчет цепей с постоянными магнитами

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ И РЕЛЕ

Глава 5. Вопросы проектирования электромагнитов

Глава 6. Вычисление сил и моментов

Глава 7. Расчет экрана для устранения вибраций якоря

Глава 8. Магнитные системы с поворотным якорем

Глава 22. **Пружины**

Глава 23. **Контактные системы**

Глава 24. **Направляющие для вращательного движения**

Файвель Аронович Ступель
Электромеханические реле
Основы теории, проектирования и расчета

Учебное пособие

Редактор *Д. А. Вайнберг*
Технический редактор *Я. Т. Чернышенко*
Корректоры *В. М. Потапов, Н. Н. Евсеева*

Подписано к печати 2/VIII—1956 г. БЦ 06783. Тираж 20.000. Формат 60×92 1/16.
Объем 11,12 б. л.=22 1/4 п. л. 23,5 уч. изд. л.=В 1 п. л. 42600 зн.
Цена в переплете 9 руб. 75 коп.

Напечатано с матриц, изготовленных на Харьковской книжной фабрике им. Фрунзе, в типографии «Коммунист» Главиздата Министерства культуры УССР, Харьков, Пушкинская, 29.